

JOÃO NOGUEIRA FILHO

A BACIA HIDROGEOLÓGICA DE CURITIBA

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Curso de Pós-Graduação em Geologia, Área de Concentração Geologia Exploratória, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador Principal:

Prof. Dr. Paulo Cesar Soares

Co-orientadores:

Prof. Dr. Ernani Francisco da Rosa F.º.

Prof. Dr. Francisco J. Fonseca Ferreira

CURITIBA

1997

TERMO DE APROVAÇÃO

JOÃO NOGUEIRA FILHO

A Bacia Hidrogeológica de Curitiba

Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Geologia, com área de concentração em Geologia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos Professores:

Presidente: Prof. Dr. Paulo César Soares

Prof. Dr. Osmar Sinelli

Prof. Dr. Sidnei Pires Rostirolla

Curitiba, dezembro de 1997

JOÃO NOGUEIRA FILHO

A BACIA HIDROGEOLÓGICA DE CURITIBA

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no
Curso de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná, pela
Comissão formada pelos professores:

Orientador : Prof. Dr. Paulo Cesar Soares

Prof. Dr. Osmar Sinelli

Prof. Dr. Sidnei Pires Rostirolla

Curitiba, 03 de dezembro de 1997

**Ao meu pai, Sr. JOÃO NOGUEIRA,
que jamais se entregou sem lutar,
que o medo não conseguiu deter,
indignado com a covardia e a vilipendiência,
teve a dignidade humana como valor maior,
e sabendo que sem ela a existência é ignóbil,
morreu defendendo-a,
imortalizando-se em minha memória,
como raro exemplo de Homem e cidadão.**

**Ao Prof. Dr. Paulo Cesar Soares,
cujos ensinamentos técnicos e de metodologia científica
devo creditar não apenas as idéias que norteiam esta
dissertação, mas, muito mais que isto, a perspectiva
da organização lógica das idéias permitindo
uma visão universal do conhecimento.**

"...Ser seu amigo é procurar ser honrado intelectualmente..."

John Reed (México Rebelde)

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	vii
LISTA DE ANEXOS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE FOTOGRAFIAS.....	xii
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
AGRADECIMENTOS.....	xv
1 INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Objetivos.....	11
2 FISIOGRAFIA.....	12
2.1 Clima.....	12
2.2 Solos.....	13
2.3 Hidrografia	14
2.3.1 Alinhamentos estruturais associadas às drenagens.....	16
2.4 Relevo.....	19
3 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	25
3.1 Aspectos regionais.....	25
3.2 Aspectos restritos à área de estudo.....	28
3.2.1 Complexo Migmatítico-Gnáissico.....	28
3.2.2 Complexos metassedimentares.....	28
3.2.3 Diques de Diabásio.....	30
3.2.4 Bacia Sedimentar de Curitiba.....	30
3.2.4.1 Formação Guabirotuba.....	30
3.2.5 Depósitos Aluvionares.....	31
4 AQUÍFEROS DA ÁREA DE ESTUDO.....	33
4.1 Depósitos aluvionares recentes.....	33
4.2 Lentes arcossianas da Formação Guabirotuba.....	34
4.2.1 Parâmetros e variáveis hidráulicas.....	34
4.3 Diques de Diabásio.....	37

4.4 Superfície de contato entre os sedimentos da Bacia de Curitiba e rochas do Embasamento Cristalino.....	39
4.5 Complexo Migmatítico-Gnáissico.....	40
5 AQUISIÇÃO, COMPILAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	43
5.1 Dados utilizados.....	43
5.2 Trabalhos realizados.....	53
5.3 Fluxograma de desenvolvimento do Trabalho.....	56
6 TRATAMENTO DOS DADOS.....	57
6.1 Geoprocessamento.....	57
6.1.1 Modelagem dos dados.....	58
6.1.1.1 Modelo Digital de Terreno (MDT).....	59
6.2 Geoestatística.....	62
6.2.1 Generalidades.....	62
6.2.2 Aplicações.....	63
6.2.3 Fundamentos lógicos básicos.....	63
6.2.4 Fundamentos conceituais - geoestatística para hidrogeologia.....	63
6.2.5 Elementos para interpretação das funções.....	65
6.2.5.1 O variograma.....	65
6.2.6 Determinação dos erros associados - a variância da estimação.....	66
6.2.7 Intervalo de confiança.....	67
6.2.8 Análise estrutural.....	67
6.2.8.1 Continuidade.....	68
6.2.8.2 Zona de influência.....	68
6.2.9 Comportamento do meio.....	69
6.2.9.1 Implicações das zonas de influências sobre meios anisotrópicos.....	69
6.2.10 Elementos do variograma.....	70
6.2.11 Análise estrutural e modelização.....	71
6.2.12 Krigagem.....	73
6.2.13 Recursos de processamento utilizados.....	75
6.3 Análise de superfície de tendências.....	75

6.4 Geofísica.....	77
6.5 Hidrogeoquímica.....	78
7 RESULTADOS OBTIDOS.....	80
7.1 Lineamentos estruturais em fotografias aéreas.....	80
7.2 Modelo digital de terreno.....	82
7.2.1 Alinhamentos estruturais sobre o modelo digital de terreno.....	90
7.3 Superfície do embasamento da Bacia de Curitiba.....	93
7.4 Gravimetria.....	96
7.5 Variabilidade espacial das vazões.....	111
7.5.1 Análise do efeito buraco.....	117
7.6 Superfície potenciométrica: tendência e variações locais.....	120
7.7 Limite superior dos aquíferos fraturados.....	126
7.8 Mapa de isóbatas dos sistemas aquíferos.....	131
7.9 Seções geológicas.....	133
7.10 Hidrogeoquímica.....	134
8 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	144
9 CONCLUSÕES.....	157
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	159
LISTA DE ANEXOS	
ANEXO 1 - Seção hidrogeológica AA' (NW-SE).....	165
ANEXO 2 - Seção hidrogeológica BB' (NE-SW).....	166
ANEXO 3 - Seção hidrogeológica CC' (NE-SW).....	167
ANEXO 4 - Seção hidrogeológica DD' (NE-SW).....	168

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da área.....	01
Figura 2 - Mapa geológico regional.....	02
Figura 3 - Diagrama do volume elementar representativo para rochas fraturadas...	06
Figura 4 - Representação esquemática do suporte determinado para correlações no meio fraturado estudado.....	07
Figura 5 - Dados de precipitação pluviométrica na cidade de Curitiba-PR.....	12
Figura 6 - Sistemas de drenagens regionais.....	14
Figura 7 - Alinhamentos traçados sobre sistemas de drenagens regionais.....	17
Figura 8 - Alinhamentos traçados sobre planícies aluviais.....	18
Figura 9 - Compartimentação geomorfológica do primeiro planalto paranaense.....	20
Figura 10 - Seção geológica regional.....	26
Figura 11 - Mapa geológico da área investigada.....	29
Figura 12 - Seção geológica da Formação Guabirotuba.....	32
Figura 13 - Distribuição dos poços tubulares, cadastrados neste trabalho.....	43
Figura 14 - Anisotropia estrutural expressa em variograma.....	70
Figura 15 - Variograma genérico e elementos envolvidos.....	70
Figura 16 - Modelos de variogramas com patamar.....	72
Figura 17 - Manifestação do “efeito buraco” sobre variogramas (a) com patamar, (b) sem patamar.....	72
Figura 18 - Relações geométricas das equações de 1º, 2º e 3º graus, para duas e três dimensões.....	76
Figura 19 - Alinhamentos traçados sobre as principais drenagens.....	80
Figura 20 - Alinhamentos traçados sobre fotografias-aéreas.....	81
Figura 21 - Modelo digital de terreno.....	83
Figura 22 - Modelo digital de terreno e as principais drenagens.....	84
Figura 23 - Modelo digital de terreno e as divisões administrativas da cidade de Curitiba.....	85
Figura 24 - Modelo digital de terreno e os principais arruamentos da cidade de Curitiba.....	86

Figura 25 - Mapa geológico sobreposto ao modelo digital de terreno.....	87
Figura 26 - Modelo digital de terreno com iluminação a partir do azimute 270°.....	88
Figura 27 - Modelo digital de terreno, com iluminação a partir do azimute 330°.	89
Figura 28 - Alinhamentos estruturais reconhecidos a partir do modelo digital de terreno.	90
Figura 29 - Alinhamentos estruturais reconhecidos a partir do modelo digital de terreno. Iluminação a partir do azimute 270°.....	91
Figura 30 - Alinhamentos estruturais sobre modelo digital de terreno (iluminação a partir do azimute 330°.....	92
Figura 31 - Histograma de frequência para dados altimétricos do contato dos sedimentos da Bacia de Curitiba com o Embasamento Cristalino.....	93
Figura 32 - Variograma total para dados altimétricos do contato entre sedimentos da Bacia de Curitiba e rochas do embasamento da bacia.....	94
Figura 33 - Percentuais de correlação entre polinômios e a superfície do embasamento dos sedimentos da Bacia de Curitiba.....	94
Figura 34 - Superfície de tendência de 4º grau para cotas altimétricas do contato entre sedimentos da Bacia de Curitiba e rochas do Embasamento Cristalino.....	95
Figura 35 - Histograma de frequência para dados de anomalias Bouguer.	96
Figura 36 - Diagrama de frequência acumulada para dados de anomalia Bouguer.....	97
Figura 37 - Histograma de frequência realizado com número de dados reduzidos.	97
Figura 38 - Diagrama de frequência acumulada para dados de anomalia Bouguer.....	98
Figura 39 - Variograma para dados de anomalia Bouguer, omnidirecional.....	98
Figura 40 - Correlações de ajuste entre polinômios e a superfície gravimétrica.....	99
Figura 41 - Curvas de valores estimados de tendência, a partir de um polinômio de 3º ordem, para anomalia Bouguer.	100
Figura 42 - Histograma de frequência para dados de resíduos de 3º grau anomalia Bouguer.....	101

Figura 43 - Variograma para resíduos de 3º de anomalia Bouguer.	101
Figura 44 - Variogramas para resíduos de 2ª e 5ª ordem de anomalia Bouguer.....	102
Figura 45 - Localização das estações gravimétricas.....	102
Figura 46 - Nova disposição dos pontos das anomalias gravimétricas, após a realização de <i>decluster</i> e redução da área de amostras.	103
Figura 47 - Histograma de frequência para dados de anomalia Bouguer.....	104
Figura 48 - Variograma para dados de anomalia Bouguer.	105
Figura 49 - Estações gravimétricas selecionadas, após a restrição da área.....	105
Figura 50 - Histograma de frequência para dados de anomalia Bouguer.....	106
Figura 51 - Variograma para dados de anomalia Bouguer.	106
Figura 52 - Percentuais de correlação entre dados de anomalia gravimétrica Bouguer.	107
Figura 53 - Variograma para dados de resíduos de 1º ordem de anomalia Bouguer.....	108
Figura 54 - Variograma para dados de resíduos de 1º ordem de anomalia Bouguer.....	108
Figura 55 - Registro de pulsos do “efeito buraco”.....	109
Figura 56 - Mapa de contorno de anomalia Bouguer.....	110
Figura 57 - Histograma de frequência para dados de vazões de poços tubulares.....	112
Figura 58- Variograma dos dados logaritmados de vazão.....	112
Figura 59 - Variograma do eixo maior do elipsóide, N25E.....	113
Figura 60 - Variograma do eixo menor do elipsóide.....	114
Figura 61 - Mapa de distribuição de vazões.....	115
Figura 62 - Mapa de erros associado às vazões.....	116
Figura 63 - Distribuição orientada dos valores de máxima e mínima variância, na curva variograma, de vazões em poços tubulares.....	117
Figura 64 - Dimensão dos aquíferos revelados pela análise variográfica.....	119
Figura 65 - Histograma de frequência para dados de altitude potenciométrica de poços tubulares.....	120
Figura 66 - Curva de probabilidade para dados de altitude potenciométrica.....	121

Figura 67 - Variograma dos dados de altitude potenciométrica.....	121
Figura 68 - Gráfico de correlação entre polinômios de ajustes à superfície potenciométrica.....	122
Figura 69 - Histograma de resíduos de dados potenciométricos.....	123
Figura 70 - Variograma dos dados de resíduos de altitude potenciométrica.....	123
Figura 71 - Resultado da krigagem ordinária dos dados de altitude potenciométrica.....	124
Figura 72 -Superfície de tendência de 3º grau para altitude potenciométrica.....	125
Figura 73 - Histograma de frequência para dados altimétricos de entradas de água.....	126
Figura 74 - Variograma total para dados de altimetria das entradas d'água.....	127
Figura 75 - Percentual de correlação entre polinômios de graus diversos e a superfície determinada pelos dados de entradas d'água.....	127
Figura 76 - Histograma de frequências de dados altimétricos de entradas d'água.....	128
Figura 77 - Histograma de frequências dos resíduos, de 3º ordem, para dados de cotas altimétricas de entradas d'água.....	128
Figura 78 - Variograma dos resíduos de 3º grau, para dados altimétricos das entradas de água.....	129
Figura 79 - Superfície de contorno de tendência de 3º grau, de cotas altimétricas das entradas d'água em poços tubulares.....	130
Figura 80 - Mapa de isóbatas.....	132
Figura 81 - Diagrama de Piper.....	135
Figura 82 - Diagrama de Khorzinskii.....	137
Figura 83 - Diagrama de Khorzinskii mostrando os campos de estabilidade de produtos de alteração em relação ao íon potássio.....	138
Figura 84 - Diagrama de Khorzinskii mostrando os campos de estabilidade de produtos de alteração em relação ao íon cálcio.....	138
Figura 85 - Distribuição de valores de concentração do íon sódio.....	140
Figura 86 - Distribuição de valores de concentração do íon potássio.....	141
Figura 87 - Distribuição de valores do íon cálcio.....	142

Figura 88 - Distribuição de valores do HCO_3^-	143
Figura 89 - Modelo conceitual da Bacia Hidrogeológica de Curitiba.....	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de vazões médias de alguns dos cursos d'água da área de estudo e vizinhanças (CEHPAR, 1994).....	15
Tabela 2a - Dados de poços tubulares.....	44
Tabela 2b - Dados de poços tubulares (continuação).....	45
Tabela 2c - Dados de poços tubulares (continuação).....	46
Tabela 2d - Dados de poços tubulares (continuação).....	47
Tabela 2e - Dados de poços tubulares (continuação).....	48
Tabela 2f - Dados de poços tubulares (continuação).....	49
Tabela 2g - Dados de poços tubulares (continuação).....	50
Tabela 3a - Dados físico-químicos de poços tubulares.....	51
Tabela 3b - Dados físico-químicos de poços tubulares (continuação).....	52
Tabela 4 - Resultado de testes estatísticos entre populações de diferentes aquíferos.....	53
Tabela 5 - Parâmetros do modelo variográfico do eixo maior do elipsóide.....	114
Tabela 6 - Parâmetros do modelo variográfico do eixo menor do elipsóide.....	114
Tabela 7 - Valores calculados pelo variograma para definição do elipsóide estrutural.....	116
Tabela 8 - Dados do variograma de vazões mostrando o espaçamento entre registros do “efeito buraco”.....	118
Tabela 9 - Parâmetros para krigagem dos resíduos de altitude potenciométrica obtidos por variografia.....	123

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Foto 01 - Exposição de lente de areia arcossiana da Formação Guabirotuba na cidade de Pinhais (proximidades da avenida Maringá).....	35
Foto 02 - Detalhe da foto 01.....	35
Foto 03 - Aspecto da fotografia anterior.....	36

Foto 04 - Zona de contato entre os sedimentos da Formação Guabirotuba e migmatitos intemperizados do embasamento cristalino (Pedreira do Atuba, Curitiba-Pr).....	39
Foto 05 - Exposição de rochas do Complexo Gnáissico-Migmatítico (Pedreira do Atuba, Curitiba-PR).....	40
Foto 06 - Aspecto da foto 05.....	41

RESUMO

A Bacia de Curitiba, entidade geológica formada no Cenozóico, distribui-se sobre sequências metassedimentares, proterozóicas, e sobre complexos de rochas gnáissico-migmatíticas. A região integra parte do Cinturão Ribeira, cujo registro geológico revela evolução marcada por eventos geológicos policíclicos, os quais produziram zonas fortemente recortadas por descontinuidades estruturais.

A área estudada engloba a cidade de Curitiba e parte da região metropolitana. Os sistemas aquíferos da área são representados por lentes de arcósios dispostas entre estratos argilosos da Bacia Sedimentar de Curitiba e, principalmente, por sistemas de fraturas em rochas cristalinas.

O objetivo deste trabalho envolve o reconhecimento de controles estruturais estabelecido pela entidade "Bacia de Curitiba" sobre aquíferos da área estudada.

Foram traçados alinhamentos estruturais, reconhecidos em fotografias aéreas, e comparados com feições geomorfológicas indicativas de alinhamentos estruturais, ressaltados através de um modelo digital de terreno. Outras variáveis, analisadas através de estatística e geoestatística, tiveram a distribuição estimada para toda a área estudada, como: vazões de poços tubulares, altitudes do nível estático e das entradas d'água. Estas foram integradas com mapas de altitude do topo do embasamento da Bacia de Curitiba e alinhamentos estruturais reconhecidos em levantamentos gravimétricos.

Os resultados obtidos revelaram comportamento coerente dos aquíferos com a estruturação geológica regional, sugerindo controles estruturais sobre as direções médias de fluxo das águas subterrâneas. Estas relações são demonstradas pela distribuição georeferenciada de variáveis regionalizadas, cujos padrões observados revelaram se processar segundo o funcionamento de uma bacia hidrogeológica, aqui denominada "Bacia Hidrogeológica de Curitiba".

ABSTRACT

The Cenozoic geological entity represented by the Curitiba Basin lies over metasedimentary sequences to the north of the City of Curitiba and directly over a complex of gnaissic-migmatitic rocks to the middle-south. The region is part of the Ribeira Belt, a region strongly affected by structural discontinuities and by the intrusion of igneous bodies. Despite being much more recent than the other units in Ribeira Belt, the Curitiba Basin lies conformably over the regional structures.

The aquifer systems of the area are represented by arcose lenses within clayey strata and, especially, by fracture systems within crystalline and metasedimentary rocks .

The structural control of these entities is reflected in the ground water flow patterns, which are relatively independent of the environment due to a strong communication of the aquifer systems.

In the present study, lineaments were identified through aerial photographs and compared to geomorphological features characteristic of structural lineaments, which were made more prominent in a digital elevation model.

Other variables, which had their behavior assessed through classical and geostatistical methods, had their distribution estimated for the whole area: discharge of tubular wells and the altitudes of the static level and the inlets. These variables were integrated to altimetric maps of the basement of the Curitiba Basin and structural trends revealed by gravimetric studies.

The results reveal a coherent behavior of the aquifers with the regional structures. The georeferenced distribution of the regional variables shows that the inter-relations observed between the hydrogeological entities over the area of study are in accordance with the development of a hydrogeological basin.

AGRADECIMENTOS

O autor, durante a elaboração deste trabalho, teve a grata satisfação de contar com a colaboração de diversos profissionais, entidades, empresas e familiares, que contribuíram decisivamente para a concretização dos resultados destas pesquisas. A seguir são expressados sinceros agradecimentos a todos os que foram possíveis lembrar (antecipando sinceras desculpas por prováveis falhas de memória) desde o início dos trabalhos:

- Às construtoras ACQUASUL POÇOS ARTESIANOS LTDA e HIDROPEL POÇOS ARTESIANOS LTDA, que gentilmente forneceram boletins de sondagem e relatórios completos de poços tubulares;
- À CAPES, pelo apoio financeiro à elaboração deste projeto;
- Ao Departamento de Geologia da UFPR, pela cessão de equipamentos (projeto PADCT 65.91.0303);
- Ao curso de pós-graduação do Departamento de Geologia da UFPR, pelo apoio ao projeto;
- À GEMPI, pelo auxílio na transferência do Modelo Digital de Terreno para ambiente DOS.
- Ao CIEG (Centro Integrado de Estudos em Geoprocessamento da UFPR) pela permissão de uso dos seus equipamentos e em especial ao geólogo Oscar Salazar, pelas sugestões na solução de problemas de geoprocessamento;
- Ao IPPUC (Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba), em especial ao Engenheiro SÉRGIO SIKORSKI pela seção de dados em atendimento aos objetivos desta pesquisa.
- À COMEC (Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba), em especial aos geólogos GIL POLIDORO e ISABELLE CERJAT pela atenção dispensada na solução de problemas decorrentes do desenvolvimento destes estudos e por disponibilizar materiais indispensáveis à pesquisa.
- À SUDERHSA (Superintendência e Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), em especial ao geólogo ÁLVARO A. LISBOA por inestimáveis sugestões em questões de hidrogeologia;

- Ao SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná), em especial a MIRIAM PITTIGLIANI, pela seção de dados meteorológicos;
- À MINEROPAR (Minerais do Paraná S/A), em especial à bibliotecária MARLENE M. MARTELLI;
- Especiais agradecimentos ao geólogo MARCO A. FONTANA, por seu incentivo e apoio, bem como por sugestões em questões de exploração e abordagem da água subterrânea;
- Aos funcionários da Biblioteca do Setor de Ciências Tecnológicas da UFPR, em especial à bibliotecária ELIANE STROPARO;
- Aos professores Dr. BARRY MAYNARD (UNIVERSITY OF CINCINNATI - USA) e prof. Dr. ANDRÉ L. V. BITTENCOURT, pelas discussões sobre tratamento hidrogeoquímicos sobre os dados desta pesquisa;
- Ao prof. Dr. FRANCISCO JOSÉ FONSECA FERREIRA, pelas discussões técnicas sobre técnicas geofísicas e pela atenta e minuciosa leitura deste trabalho.
- Ao prof. Dr. ERNANI F. ROSA F.^o, pelas discussões técnicas sobre problemas hidrogeológicos e pela criteriosa análise dos produtos gerados por esta pesquisa;
- Aos colegas do curso de pós-graduação, especialmente à geóloga ELAINE A. BONACIM, pelo apoio e discussões técnicas;
- Ao geólogo CARLOS MATANA, pelas sugestões na composição do *abstract*;
- Aos funcionários: geógrafo JUAREZ B. TONETTI (Depto. Geologia), físico FRANCISCO VALDYR DA SILVA, analista de sistemas ROBERTO MELLANI e geólogos RODOILTON STEVANATO e MAXIMILIAM FORLIN (Convênio FUNPAR-UFPR), pelo apoio no manuseio de softwares e operacionalização de técnicas de geoprocessamento;
- À minha esposa, por ter me apoiado e acompanhado, pacientemente, ao longo de todos os anos do curso de pós-graduação;
- Aos meus pais, pelo incentivo e dedicação aos meus estudos e pela compreensão às restrições que este nos impõe.

1 - INTRODUÇÃO

As unidades geológicas, que compõem o substrato da cidade de Curitiba (figura 1), apresentam características que ressaltam domínios estruturais diferenciados. A norte, metassedimentos proterozóicos estão orientados no sentido NE. Migmatitos e gnaisses aflorantes a norte, centro e sul, estão recortados por sistemas de falhamentos NE, N-S e E-W. Seccionando todas estas litologias, na direção NW, ocorrem diques de diabásio mesozóicos.

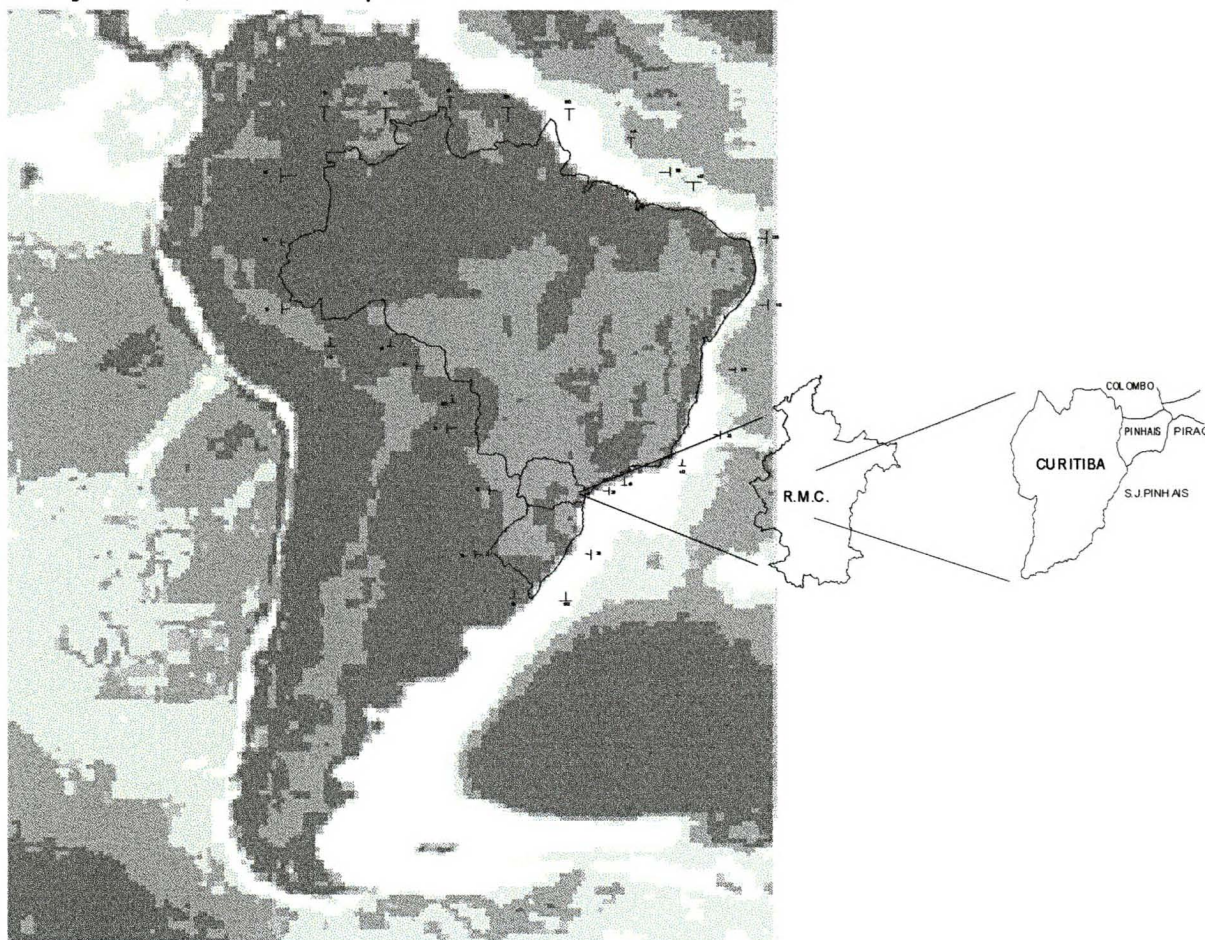


Figura 1 - Localização da área de pesquisa. Imagem com os contornos da América do Sul, onde aparecem em destaque o Brasil, o Estado do Paraná e os limites geográficos do município de Curitiba e parte da região metropolitana. A área de pesquisa situa-se entre as coordenadas geográficas 49°07' e 49°24'W e 25°25' e 25°40'S.

Estes domínios estruturais integram grandes sistemas (figura 2), nos quais, mesmo pequenas bacias sedimentares, terciário-quaternárias, apresentam

geometria que se ajustam ao padrão regional, como as Bacias de Curitiba, São Paulo, Taubaté, etc.

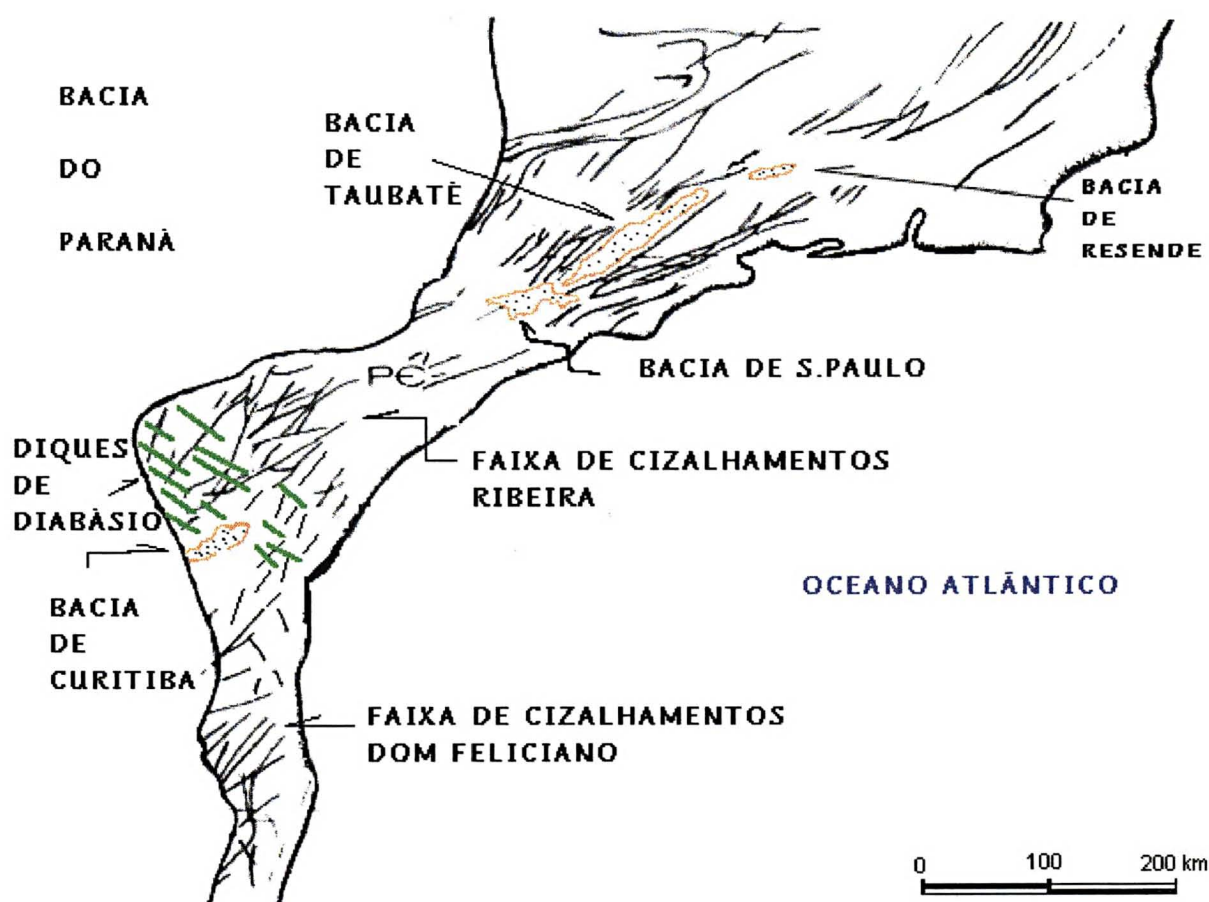


Figura 2 - Faixa de afloramento de rochas pré-Cambrianas nas quais se observam *trends* estruturais. Destacam-se extensos lineamentos na direção nordeste e, próximo à Bacia de Curitiba, o enxame de diques associados ao Arco de Ponta-Grossa (modificado de Macedo, 1990).

Integrados a estas litologias os principais sistemas aquíferos de Curitiba e região metropolitana localizam-se em fraturas que recortam migmatitos e gnaisses, eventualmente associadas a diques de diabásio; em lentes arcossianas dos sedimentos da Bacia de Curitiba e em aluviões recentes.

A configuração regional faz supor que a estruturação geológica afete também os aquíferos, de maneira que os condutos subterrâneos, através dos quais ocorre circulação de água, obedeçam padrões impostos pela interligação dos diversos sistemas estruturais expostos e reconhecidos em superfície.

Sendo assim, apesar da grande dificuldade em se determinar parâmetros hidráulicos para aquíferos fraturados, a observação dos dados hidrogeológicos coletados, examinados sob a ótica da estruturação geológica regional, pode fornecer informações sobre o comportamento da água subterrânea na região.

Os controles estruturais sobre aquíferos, na área em estudo, tem sido pouco investigados. Uma tentativa de compartimentação dos aquíferos da região metropolitana de Curitiba, associou o potencial dos aquíferos a tipos litológicos petrograficamente diferenciados e ao padrão estrutural correspondente a cada unidade (Salamuni, 1981). Naquele estudo, foram obtidas médias aritméticas para algumas variáveis de determinados aquíferos (Salamuni, *op cit*):

- vazões em poços tubulares, em áreas do Embasamento Cristalino, variaram entre 2,0 a 5,0 m³/h para diferentes regiões da região metropolitana;
- profundidade média das perfurações igual a 138,5m;
- entradas d'água limitadas a profundidades de 100m (profundidades absolutas maiores são estimadas como promissoras);
- capacidade de reservação de água subterrânea em rochas cristalinas do Complexo Migmatítico-Gnáissico avaliada em 8,0 l/m³ de rocha, até 150m de profundidade absoluta (que corresponde a valores similares aos estabelecidos para a mesma litologia da Bacia Sedimentar de São Paulo);
- capacidade de reservação utilizável, para os sedimentos arcossianos da Formação Guabirotuba, igual a 200.000.000 m³.

Estimativas de aproveitamento para poços tubulares amostrados, especialmente do Embasamento Cristalino, sugerem produção geral, para toda a Região Metropolitana de Curitiba (RMC), de 55.200 m³/dia, ou 0,64 m³/s (Salamuni, *op cit*). Esta produção estimada, na década de oitenta, se tivesse sido mantida estática, equivaleria, no ano de 1996, a 10% da necessidade de produção da Companhia de Saneamento do Paraná para abastecimento do município de Curitiba.

No mesmo estudo (Salamuni, *op cit*) os aquíferos relacionados aos sedimentos da Bacia de Curitiba foram considerados pouco promissores, em

função da predominância de sedimentos argilosos e da grande irregularidade na distribuição das lentes de arcósio. Atualmente sabe-se que poços construídos naqueles sedimentos com projetos hidráulicos específicos para as particularidades das lentes de arcósios, fornecem vazões expressivas (Rosa F.^o *et al*, 1996).

Sistemas de fraturamentos nas direções N40-50W, N50-70E, N10-20E, N10-20W e N-S; falhas de baixo-ângulo associadas a zonas milonitizadas na direção E-W; prováveis reativações tectônicas ao longo destes sistemas, bem como sistemas de fraturas atectônicas, foram, segundo a mesma pesquisa (Salamuni, *op cit*), apontados como relevantes na circulação da água subterrânea, não tendo sido, entretanto, apresentadas comprovações.

Um outro estudo realizou investigações sobre o comportamento da superfície do embasamento cristalino da Bacia de Curitiba a partir do mapa de anomalias gravimétricas Bouguer (Gemael e Doubeck, 1975, *apud* Giusti, 1989). Ao padrão expresso pelas curvas gravimétricas foram inferidas prováveis zonas de falhamentos ao longo do embasamento cristalino, tendo sido, inclusive, rastreado descontinuidades, no sentido NNE-SSW, paralelas ao eixo da bacia e de uma outra, na direção NW-SE, fora dos domínios da bacia sedimentar (Giusti, *op cit*). Foi reconhecida também, uma zona de soerguimento do embasamento cristalino à sudoeste da cidade (Giusti *et al.*, 1982). Às espessuras de sedimentos foram inferidos maiores valores na porção leste e nordeste e menores na faixa sudoeste, além de ter-se estimado o mergulho dos sedimentos, para E-SE (Giusti, *op cit*).

O exame bibliográfico indica serem raros estudos integrados sobre os aquíferos da área de pesquisa, tanto em relação à localização espacial e dimensões das entidades, como quanto aos parâmetros hidráulicos (Salamuni, 1981; Giusti, 1989). Mas, mesmo estudos localizados, realizados em parte da área de estudo, tem indicado a influência de estruturas tectônicas do embasamento sobre os aquíferos da Bacia de Curitiba. Na bacia hidrográfica do rio Irai, parece existir uma estrutura do tipo *graben*, desenvolvida em rochas do Complexo Migmatítico-Gnáissico que controlou a deposição de lentes de arcósios da Formação Guabirotuba, as quais apresentam maiores espessuras e, também, parâmetros

hidráulicos favoráveis à circulação e armazenamento de água subterrânea (Rosa F.º et al. 1996).

Entretanto, para a investigação dos atributos que controlam os sistemas aquíferos, um aspecto fundamental deve ser considerado: o produto de amostragens sobre entidades geológicas representam resultados, cujas realizações estão atreladas à localização espacial de cada amostra. Para os aquíferos fraturados, em especial, na medida em que o ponto de coleta de dados se desloca poucos metros, o resultado seguinte, de cada variável, pode ser substancialmente diferente.

O método estatístico mais adequado para o tratamento de dados georeferenciados deve ser tal que considere a realização espacial de cada ponto em relação às amostras vizinhas. Este método é a geoestatística, a qual, além de produzir a distribuição de médias, em função do valor e da posição espacial de cada ponto, ainda fornece o erro associado a cada estimativa.

Outro cuidado importante no estudo dos aquíferos refere-se ao registro dos dados de profundidades. Quando estes representam, simplesmente, valores absolutos, extrapolações para a totalidade da área do município, perdem qualquer referência, uma vez que existem desníveis altimétricos no terreno da ordem de 160m. Para eliminar este problema torna-se necessário o estabelecimento de um *datum* para referência de profundidades.

Outros problemas verificados no estudo dos aquíferos da área em enfoque envolvem a densa urbanização da região. Esta, cria obstáculos à pesquisa geológica, na medida em que as edificações impossibilitam o acesso aos afloramentos. Além disso, costumam inviabilizar a aplicação de alguns métodos indiretos de investigação geofísica.

Uma outra dificuldade refere-se às dimensões e parâmetros hidráulicos dos aquíferos fraturados. Devido à heterogeneidade do meio, estes são de difícil determinação e por este motivo, o entendimento do funcionamento dos sistemas aquíferos torna-se bastante problemático. Em relação a este problema adotou-se, neste trabalho, a chamada abordagem macroscópica ou contínua (Domenico e Schwartz, 1990; pg. 84).

Esta, implica em assumir, como unidade de estudo, volumes de rocha fraturada que, por um lado, são suficientemente grandes para não influenciar a unidade, por relações localizadas de permeabilidade entre fraturas, dentro de cada bloco; e, por outro lado, suficientemente pequenas para permitir investigações sobre as variações espaciais entre blocos distintos (figura 3).

Desta forma, considera-se, hipoteticamente, que a massa rochosa, fraturada, é hidraulicamente equivalente a um meio poroso. Desta forma, a entidade geológica "Bacia de Curitiba" passa a ser considerada como um meio homogêneo.

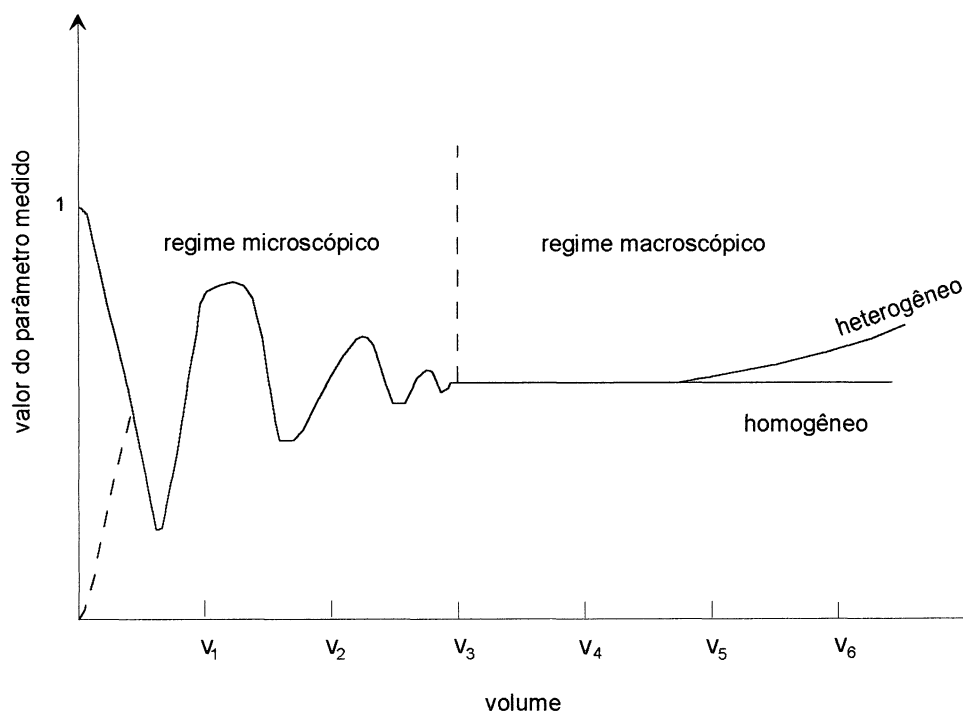


Figura 3 - Diagrama de ilustração do volume elementar representativo (modificado de Hubbert, 1956 *apud* Domenico e Schwartz, 1990).

O volume unitário é considerado um meio contínuo para as variáveis hidrogeológicas examinadas. A realização destas medidas constituem médias estatísticas com pequena variância.

A identificação do "suporte", representado pelo volume unitário, em aquíferos fraturados de rochas cristalinas pode ser exemplificado pela amplitude da escala de observação sobre diferentes volumes de rocha (figura 4).

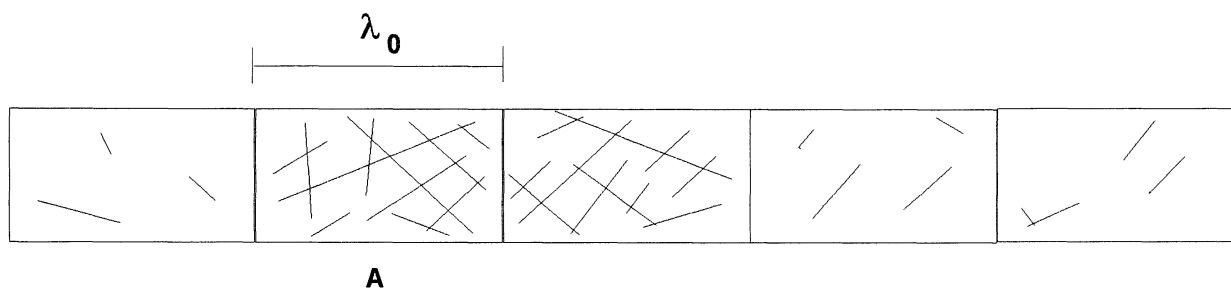


Figura 4 - Representação esquemática da densidade de fraturamento em rochas cristalinas, na área de estudo. Blocos de igual tamanho ("A") apresentam concentrações variadas de traços, indicando forte irregularidade na ocorrência das descontinuidades. λ_0 representa a distância limite ao bloco especificado.

Para melhor ilustrar o conceito enunciado considere, na figura 4, o bloco "A". Este representa o "suporte" para amostragem de volumes máximos, válidos para correlações entre os aquíferos fraturados. O valor de " λ_0 " significa a distância para qual a variância interna do bloco é mínima. Para amplitudes de distância $< \frac{1}{2} \lambda$ e/ou $> \lambda_0$ a heterogeneidade passa a ser expressivamente maior, caracterizando, então, alternativamente, um regime microscópico, ou megascópico, que impede a aplicação de modelos baseados em meios fraturados homogêneos para circulação da água subterrânea.

No decorrer desta pesquisa, o valor do "suporte" apresenta-se calculado através de análise estrutural em variogramas construídos separadamente para analisar diferentes variáveis. Os resultados estão descritos no capítulo "Resultados Obtidos".

Deve-se ressaltar também, neste estudo, que ao se referir à entidade geológica "Bacia de Curitiba" está-se considerando, além dos estratos sedimentares, também um certo volume de rochas do embasamento cristalino afetadas por estruturas falhadas originadas pela implantação da bacia.

Com o auxílio da tecnologia de geoprocessamento, foram realizadas interpolações sobre diferentes variáveis envolvidas no funcionamento dos sistemas aquíferos, a partir dos princípios anunciados anteriormente, utilizando-se métodos geoestatísticos. A krigagem dos valores de vazões geraram imagens nas quais, as concentrações de valores definem alinhamentos preferenciais. A cada produto

foram superpostos outros *layers*: de alinhamentos traçados sobre as drenagens; de tendência das curvas gravimétricas e dos elementos morfoestruturais de relevo traçados sobre um modelo digital de terreno (Nogueira F.º e Soares, 1996).

Os dados gravimétricos que geraram o “Mapa de Anomalias Bouguer” (Gemael e Doubeck, 1975), empregados para deduzir zonas de alinhamentos estruturais na cidade de Curitiba (Giusti *et al.*, 1982), foram novamente interpolados a partir de parâmetros obtidos por geoestatística. Os dados de anomalias Bouguer, variografados, caracterizaram certa repetitividade e anisotropia dos fenômenos estruturais (Nogueira F.º. *et al.*, 1996b).

A análise e interpretação de dados de poços tubulares georeferenciados, realizadas através da interpolação das variáveis, por meio do cálculo de superfícies de tendência, produziram diversos mapas de contorno como: altitude potenciométrica; superfície de contato entre os sedimentos da Bacia de Curitiba e o Embasamento Cristalino e a área representada pelas cotas altimétricas das entradas d’água em poços tubulares, comparadas com uma seção geológica longitudinal ao eixo da Bacia de Curitiba (Nogueira F.º. *et al.*, 1996a).

Na área de pesquisa, a investigação hidrogeoquímica sobre os aquíferos proporcionou a individualização de propriedades iônicas das águas coletadas em poços tubulares identificando fácies hidrogeoquímicas. O comportamento geoquímico de fácies carbonáticas, permitiu deduções sobre padrões de fluxo e trocas iônicas entre aquíferos. Foi também constatado que a qualidade das águas subterrâneas, na RMC, satisfaz os padrões de potabilidade para o consumo humano, desde que respeitados os parâmetros normatizados (ABNT, 1990) da construção de unidades de captação subterrânea (Nogueira F.º e Bittencourt, 1995).

A superposição de *layers*, a partir de mapas de contorno e geológico, foi realizada até alcançar indicativos para traçar um modelo do comportamento do fluxo subterrâneo ao longo de toda a área estudada, bem como de zonas vocacionais para ocupação urbana (Nogueira F.º e Soares, 1997).

Os produtos obtidos pela interpolação dos dados, através de geoestatística ou por superfícies de tendência, se mostraram adequados ao

equacionamento da configuração dos aquíferos e dos padrões de funcionamento dos sistemas controladores da movimentação da água subterrânea na área de pesquisa.

Admite-se que os alinhamentos estruturais constituam expressões de descontinuidades geológicas e que estas transformam-se em condutos e acumuladores para a água subterrânea. Diversos tipos de alinhamentos foram mapeados e comparados com o padrão de distribuição das variáveis hidráulicas, hidrogeoquímicas e geofísicas, revelados em mapas de contorno ou em imagens de estimação das variáveis. Como resultado, verifica-se um possível padrão geral de controle dos aquíferos por entidades estruturais.

A configuração estrutural das unidades geológicas presentes na área de pesquisa, bem como os resultados obtidos pelo tratamento dos dados dos aquíferos examinados, possibilitaram elaborar um modelo de comportamento da circulação das águas subterrâneas. Este modelo ajusta-se à definição proposta por Castany (1971, pg.48) para Bacias Hidrogeológicas, definida como: *“uma unidade estrutural que determina o manto aquífero e por conseguinte, condiciona a circulação subterrânea e as reservas”*. Neste trabalho, este modelo é estendido à circulação das águas subterrâneas, tanto em meio fraturado, como em meio poroso, estando controlado pela superfície de descontinuidade do embasamento da Bacia de Curitiba.

O mapeamento da interconexão entre aquíferos fraturados, definindo superfícies de fluxo subterrâneo, em áreas similares à estudada, foi analisada por diversos autores (Patton e Hendron, 1974; Littleboy, 1996; Black e Brightman, 1996), de maneira a sugerir controles de fluxo por entidades geotectônicas regionais. Na área de pesquisa a interconexão entre aquíferos fraturados e entre aquíferos fraturados e porosos, revelada pelas análises e interpretação dos dados de poços tubulares, permite sugerir que o comportamento do fluxo subterrâneo, da área em estudo, está controlado por uma estrutura denominada Bacia Hidrogeológica de Curitiba.

A importância da identificação e das formas pelas quais as entidades estruturais influenciam os sistemas aquíferos, estão atreladas à necessidade de se

equacionar a potencialidade dos aquíferos, visando à exploração racional de água subterrânea à fim de que esta possa participar, de maneira perene e satisfatória, do atendimento da demanda da população local.

A região metropolitana de Curitiba, em 1996, apresentava população, segundo o IBGE, de 2.425.361 habitantes (Indústria & Comércio, 06/08/97), com taxa de crescimento da população de 3,4% ao longo dos últimos seis anos. A demanda por água, registrada pela SANEPAR (Companhia de Saneamento Público do Estado do Paraná) atinge 6,0 m³/s (Saunitti, 1997, comun. pessoal). Entretanto este registro não computa uma outra parte da demanda suprida por poços tubulares, privados.

Paralelamente ao crescimento demográfico, aumentou também a pressão pela construção de novas unidades de poços tubulares. Advém, então, um problema ambiental importante: se a construção de poços tubulares continuar aumentando, sem regras de exploração que considerem as limitações físicas dos aquíferos, pode-se atingir, inevitavelmente, a saturação da exploração dos mesmos.

A dificuldade em se estabelecer critérios de aproveitamento, reside na dificuldade de mapeamento e caracterização dos aquíferos, não apenas por estes encontrarem-se em meio fraturado, mas também pelas dificuldades de estudo impostas pela urbanização da área.

A qualificação e quantificação dos sistemas aquíferos possibilitarão o planejamento da exploração racional de água subterrânea, na cidade de Curitiba, pelo órgão ambiental responsável, bem como o planejamento ambiental de desenvolvimento da cidade de Curitiba e vizinhanças. Esta tarefa dificilmente se completará com estudos isolados, exigindo investigações contínuas, onde os modelos propostos de funcionamento dos aquíferos sejam testados e ajustados, conforme novos dados de perfuração venham a ser incorporados àqueles existentes, os quais devem sofrer frequente atualização.

Neste trabalho, são apresentados resultados do tratamento, através de geoestatística, de diversas variáveis georeferenciadas dos aquíferos da área de pesquisa. Os produtos, dispostos em mapas, foram associados a elementos reconhecidos em superfície, através da observação direta ou por sensores remotos.

As descontinuidades estruturais foram demarcadas tanto em imagens aéreas como em um modelo digital de terreno, cujos traços estruturais foram executados a partir de iluminações variadas. Para a determinação do comportamento de certas variáveis, foram empregados recursos de geofísica, hidrogeoquímica, geomorfologia e geologia estrutural a partir de geoprocessamento. Os padrões encontrados parecem condizer com a forte estruturação geológica regional e ressaltam a influência de entidades tectônicas na distribuição dos aquíferos.

1.1 OBJETIVOS

As investigações realizadas neste trabalho procuram identificar interconecções entre os sistemas aquíferos da área e a possibilidade de possuírem controle estrutural derivado de entidades geológicas regionais. Parte-se do pressuposto de que os padrões de fluxo das águas subterrâneas podem ser revelados através do tratamento e interpretação integrada das variáveis dos aquíferos consonante ao conhecimento das entidades geológicas regionais e às feições estruturais reconhecidas em superfície.

A confirmação desta hipótese contribuirá para o conhecimento do funcionamento dos sistemas aquíferos de Curitiba e poderá auxiliar projetos voltados para o aproveitamento racional das águas subterrâneas pela população.

2 - FISIOGRAFIA

As propriedades fisiográficas, relacionadas à área em estudo, propiciam a visualização da configuração externa dos sistemas aquíferos e influenciam indiretamente na dinâmica de circulação da água subterrânea.

2.1 CLIMA

As cartas climáticas indicam, em toda a região metropolitana de Curitiba, a caracterização de dois tipos climáticos, segundo a classificação de Köppen (ITCF, 1987): Cfa e Cfb. O município de Curitiba está totalmente inserido em uma área onde predomina o último tipo. Segundo esta classificação, o clima local é caracteristicamente subtropical úmido, sem estação seca.

As médias de precipitação pluviométrica verificadas na Estação Pontifícia Universidade Católica (figura 5) revelam que, nos últimos treze anos, a média anual atingiu a marca de 1.425,61mm de precipitação e que os meses em que se verificaram as maiores intensidades de chuva foram: janeiro, fevereiro, maio e dezembro. Por outro lado, o mês de agosto registra os menores índices de precipitação pluviométrica.

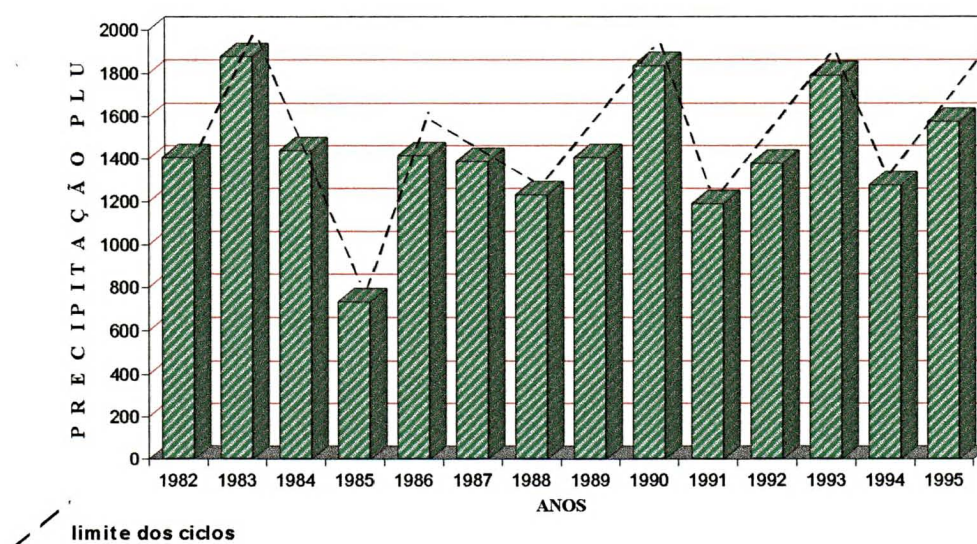


Figura 5 - Dados de precipitação pluviométrica na cidade de Curitiba-PR (I.A.P. - Estação P.U.C.), com a sugestão de ciclos.

As médias anuais, expressas no gráfico anterior, revelam algumas peculiaridades. Observa-se, para o pequeno espaço de tempo anotado, que existe uma aparente regularidade cíclica de máximas e mínimas precipitações, ou seja, épocas de secas e épocas de chuvas intensas, regularmente espaçadas. Cada período, entre um ano de mínima e máxima precipitação, completa-se em um intervalo de três anos. A ciclicidade foi afetada por evento fora do padrão, apenas nos anos de 1984 e 1987, anos em que se esperava índices de precipitação maiores. A ciclicidade permite prever para o ano de 1997 precipitação pluviométrica baixa, em relação à média, de ordem inferior a 1200mm. Deve-se observar, entretanto, que um estudo rigoroso de ciclos pluviométricos exige o registro de séries históricas mais abrangentes.

De todo modo, os registros mostram uma elevada taxa de precipitação pluviométrica na região. A proximidade do litoral e da Serra do Mar favorecem a incidência de chuvas. A disponibilidade de águas, durante todos os meses do ano sobre a superfície do terreno, permite constante infiltração de água no subsolo, favorecendo a recarga permanente dos aquíferos.

2.2 SOLOS

Na região ocupada pelos sedimentos da Bacia de Curitiba, os solos são pouco espessos variando em torno de 2,0m. Apresentam elevados teores de alumínio, devido à presença predominante de argilas montmoriloníticas da Formação Guabirotuba.

Sobre os aluviões ocorrem solos hidromórficos gleizados. São caracterizados por um horizonte superficial com espessura igual ou pouco superior a 0,3m, de coloração enegrecida, apresentam predominância de argilas e elevados teores de matéria orgânica.

Os solos dispostos sobre gnaisses e migmatitos, no município de Curitiba, apresentam as maiores espessuras, oscilando em torno de 15m. Apresentam coloração castanha escura e são formados predominantemente por argilas entremeadas por lentes de areias quartzosas.

2.3 HIDROGRAFIA

As drenagens do primeiro planalto paranaense, compreendidas entre as escarpas da Serra de São Luís do Purunã e as encostas da Serra do Mar (figura 6), onde a área em estudo ocupa pequena porção, estão reunidas em duas principais bacias hidrográficas, as quais são formadas pelos rios Iguaçu e Ribeira de Iguape. A bacia do rio Ribeira ocupa porção a norte do município de Curitiba e suas águas escoam em direção ao Oceano Atlântico. O rio Iguaçu possui nascentes na área de estudo. A bacia hidrográfica deste rio drena as águas ao longo de toda a porção meridional do Estado, até atingir o rio Paraná, no extremo oeste.

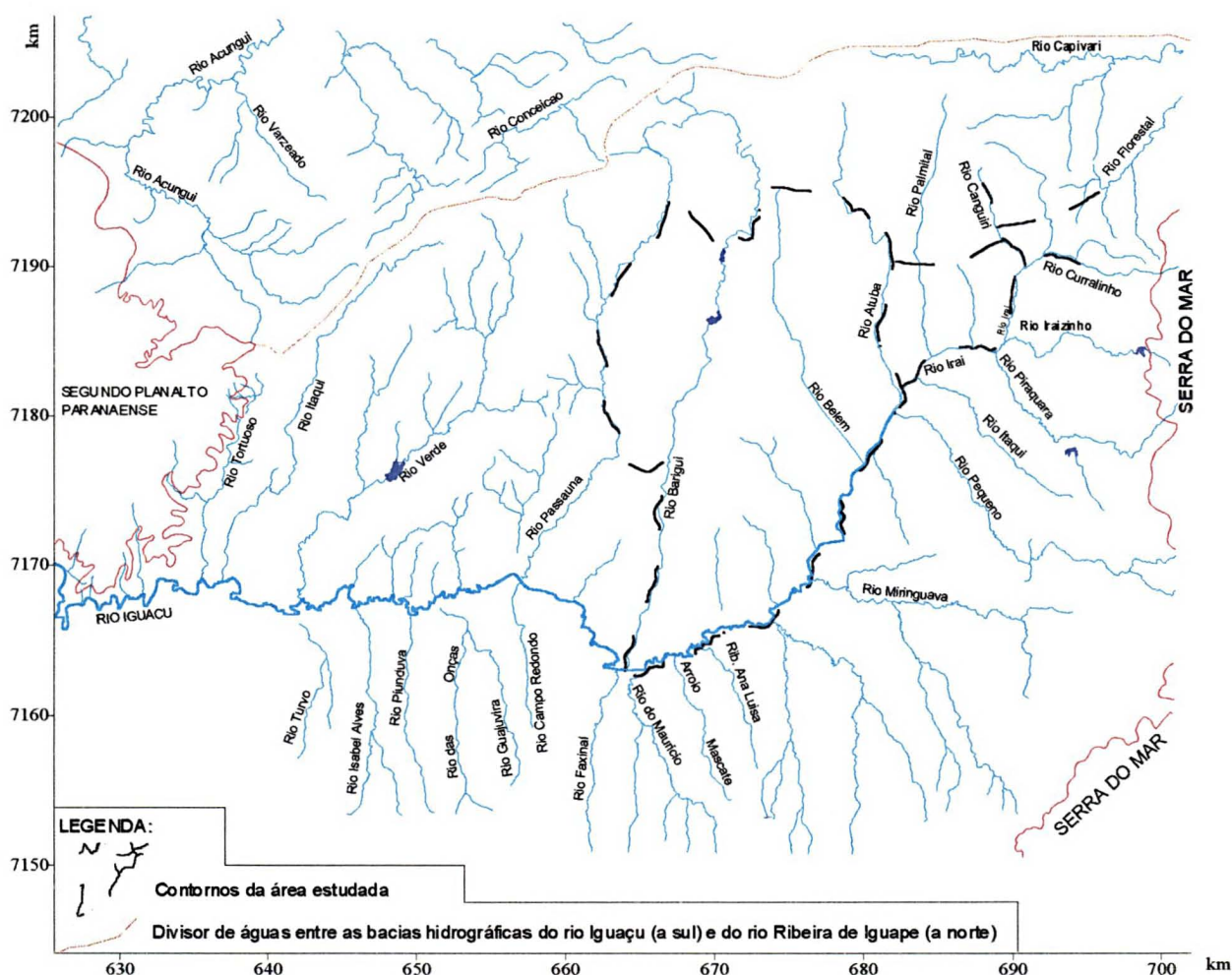


Figura 6 - Sistemas de drenagens regionais e contornos dos limites da área de pesquisa. Observar, também, o contorno das principais entidades geomorfológicas - Serra do Mar e segundo planalto paranaense (coordenadas em UTM - km).

A capacidade hídrica dos principais cursos d'água (tabela 1), não são alvo de tratamento para aproveitamento direto neste trabalho de pesquisa, mas contribuem para ressaltar variáveis relacionadas às entradas e saídas dos sistemas aquíferos em investigação.

TABELA 1 - DADOS DE VAZÕES MÉDIAS DE ALGUNS DOS PRINCIPAIS CURSOS D'ÁGUA DA ÁREA DE ESTUDO E VIZINHANÇAS (CEHPAR, 1994).

Cursos d'água	Área de drenagem <i>km²</i>	Período de observação	Vazão média de longo período	
			<i>m³/s</i>	<i>l/s/km²</i>
rio Passaúna	46	1985-1995	0,807	17,54
rio Barigui	126	1974-1995	2,231	17,70
rio Atuba	33	1984-1995	0,681	20,64
rio Conceição	105	1977-1982	1,977	18,83
rio Capivara	70	1977-1988	1,342	19,17
rio Capivari	147	1985-1995	2,529	17,20

A bacia hidrográfica do rio Ribeira de Iguaçu é caracterizada por este rio entalhar profundamente o relevo e configurar paisagem de tal forma energética, que seus afluentes apresentam de maneira conspícua, saltos e corredeiras bem como setores de aluvionamento. O padrão da drenagem é marcadamente retangular, predominantemente subsequente e secundariamente consequente (Fontana, 1988).

A área de estudo encontra-se inserida na bacia hidrográfica do rio Iguaçu. As principais sub bacias que drenam a área são as dos rios: Barigui, Belém, Passaúna, Iraí, Atuba e Palmital. O rio Iguaçu é caracterizado, como um rio antecedente, com meandros de curvas amplas e extensas várzeas.

A morfologia dos principais cursos d'água contribuem para o reconhecimento de processos tectônicos recentes. A porção compreendida entre a foz do rio Piraquara e a foz do rio Belém, configura a mais extensa planície aluvionar da região, onde meandram numerosos cursos d'água. Esta paisagem sugere possível atuação de processos tectônicos (Bigarella, 1963), através dos quais movimentos verticais ao longo de falhas alteraram o gradiente hidráulico, promovendo ajustes na morfologia de rios e canais (Ouchi, 1985, *apud* Rocha, 1996).

No primeiro planalto paranaense, associados aos principais cursos d'água, estão mapeados alagadiços, onde o nível do lençol freático alcança a superfície do terreno (figura 8). Estas regiões encontram-se distribuídas, especialmente, ao longo do rio Iguaçu e, localizadamente, no sopé das escarpas da Bacia do Paraná e em alguns rios mais próximos da Serra do Mar.

A norte do município de Curitiba, onde afloram metassedimentos pré-Cambrianos, os aluviões estão associados, sobretudo a rebaixamentos de terreno devido a subsidências e solapamentos em áreas de rochas carbonáticas.

Os alinhamentos definidos por áreas aluvionares estão relacionados, principalmente, com cotas que se situam entre 860 e 900m.

2.3.1 ALINHAMENTOS ESTRUTURAIS ASSOCIADAS ÀS DRENAGENS

As drenagens da região estudada e do seu entorno, indicam diversas direções de alinhamento geomorfológico. Por vezes, estes alinhamentos associam-se, por determinadas distâncias, a feições geológicas no terreno, diagnosticando lineamentos.

Na porção norte do primeiro planalto paranaense, sobre rochas proterozóicas metamorizadas, as drenagens alinham-se principalmente na direção $N55 \pm 5E$ (figura 7). Subordinadamente, apresenta também traços pronunciados na direção $N50 \pm 10W$, que é a direção das rochas intrusivas juro-cretácicas.

Na porção média do primeiro planalto paranaense (figura 7), pode-se observar lineamentos em duas direções principais: $N30 \pm 5E$ (rio Verde, a parte sul do rio Passaúna, rio Barigui, rio Iguaçu e rio Iraí) e $N \pm 5 S$. Nesta região, os traços revelam uma nova direção estrutural, N-S, instalada sobre rochas do Embasamento Cristalino, que, aparentemente, está ausente nos metassedimentos, a norte.

Na porção sul, predominam duas direções de lineamentos: E-W (rio Iguaçu) e N-S e, subordinadamente, a direção $N30W$, subconcordante com os diques de diabásio. Conforme se avança de norte para sul na região, diminui a presença dos lineamentos de direção geral NE-SW, predominando lineamentos N-S e E-W.

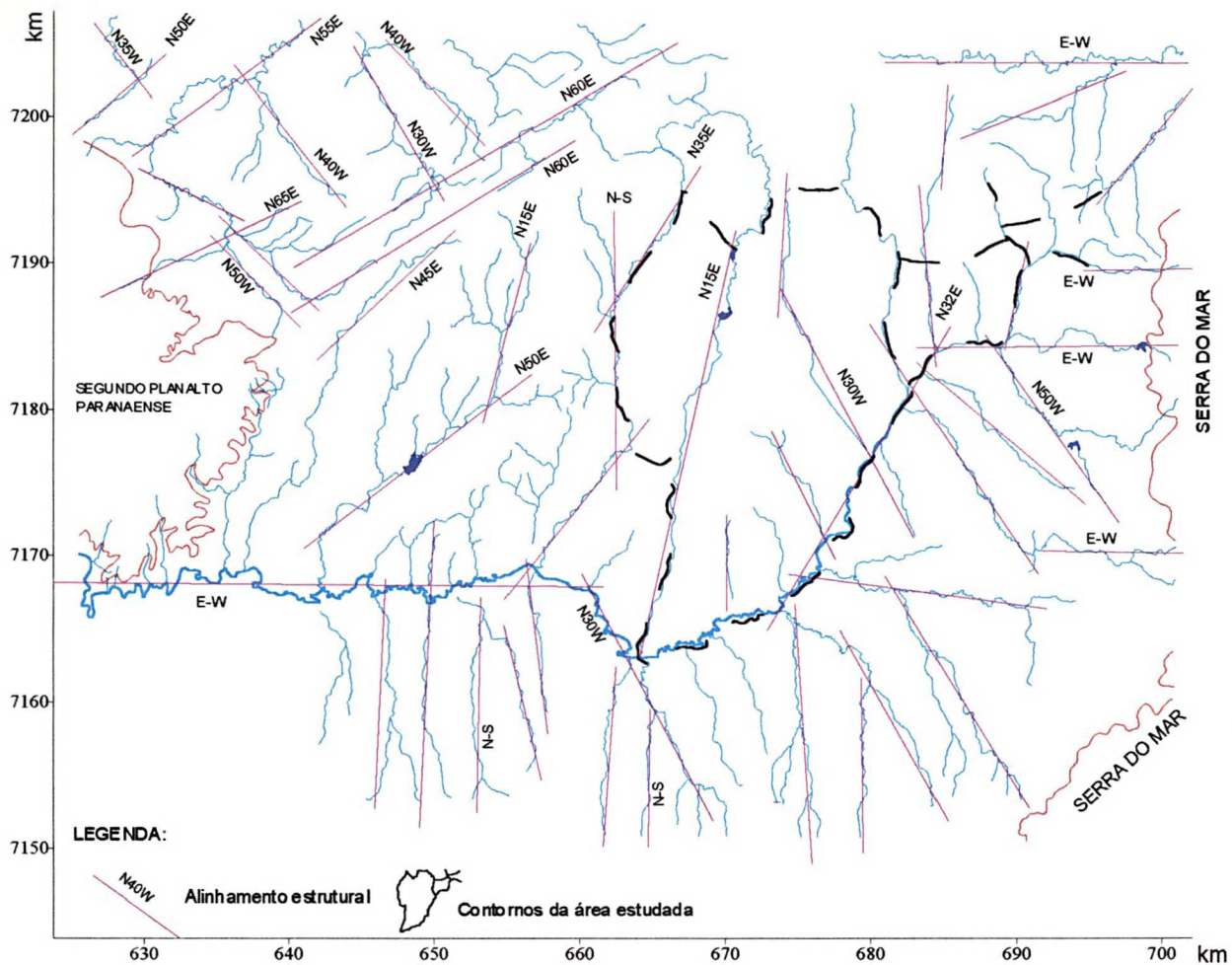


Figura 7 - Alinhamentos traçados sobre sistemas de drenagens regionais, com indicação das direções (coordenadas em UTM).

Na faixa leste, observa-se quatro direções de lineamentos: $N50 \pm 10W$ predominante - (rio Belém, rio Atuba, rio Pequeno, etc.); $N20 \pm 10E$ (rio Iguaçu, rio Iraí, rio Florestal); N-S (rio Palmital) e E-W (rio Iraizinho, rio Currallinho). Os lineamentos norte-sul estão presentes, tanto sobre rochas cristalinas do Embasamento Cristalino, como sobre sedimentos da Bacia de Curitiba.

Os lineamentos noroeste-sudeste estão associados, exclusivamente, com diques básicos intrusivos do Cretáceo.

Assim como as drenagens, os alagadiços dispõem-se espacialmente, de maneira a configurar alinhamentos estruturais (figura 8). Na área compreendida entre as UTM 630W e 655W, os alinhamentos apontam para a direção E-W. Entre o rio Maurício e o rio Iguaçu, as zonas alagadas, dispõem-se segundo NW-SE, na mesma direção dos diques de diabásio. A zona aluvionar junto ao rio Barigui, no contorno sul-sudoeste do município de Curitiba, alonga-se na direção NNE-SSW. O

rio Iguaçu, desde a sua cabeceira, até a foz do rio Barigui, apresenta zonas aluvionares dispostas na direção NE-SW.

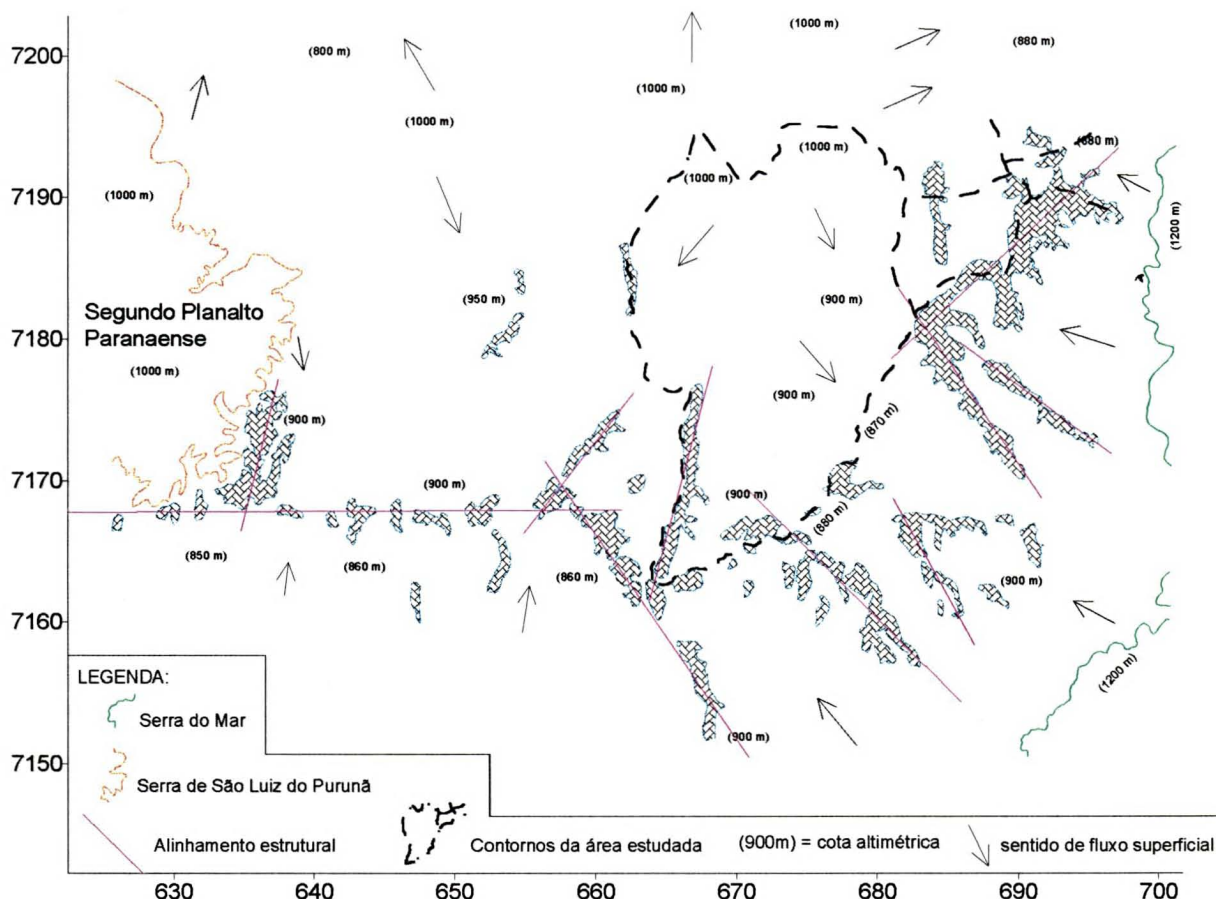


Figura 8 - Alinhamentos traçados sobre planícies aluviais ao longo de sistemas de drenagens regionais (coordenadas em UTM - km).

As variações altimétricas do relevo, indicada pelos valores das cotas altimétricas na figura 8, ressalta as grandes entidades geomorfológicas da região, a Serra do Mar e as escarpas da Serra de São Luís do Purunã. Estas, associadas às áreas onde aflora o lençol freático, indicam, genericamente, o sentido do fluxo e a amplitude das áreas de descarga das águas do lençol freático.

Nos setores leste e oeste da figura 8, ocorrem as mais extensas áreas de descarga do lençol freático, justamente onde é maior a proximidade com a Serra do Mar e a escarpa de São Luís do Purunã. Naquelas áreas, a superfície topográfica define extensas planícies de inundação do rio Iguaçu.

2.4 RELEVO

A importância do significado das formas de relevo para a compreensão dos fenômenos que controlam os sistemas aquíferos, reside na constatação de que, comumente, estruturas geológicas associadas a aquíferos são reveladas em superfície pelo traço diferenciado que imprimem ao relevo. A associação dos padrões de drenagem, a continuidade das cristas e o formato dos vales, podem indicar tanto a continuidade de camadas geológicas associadas a aquíferos porosos, como descontinuidades em rochas que propiciam a existência de aquíferos fissurados. A geomorfologia, desta forma, pode fornecer guias para a localização de aquíferos.

A área ocupada pela cidade de Curitiba e região metropolitana encontra-se em uma porção do primeiro planalto paranaense, a qual está lateralmente limitada pelas encostas da Serra do Mar, a leste, e as escarpas do segundo planalto paranaense, a oeste. O relevo deste planalto apresenta, em perfil, características geomorfológicas que permitem dividi-lo em três unidades distintas (figura 9), conforme relações espaciais, processos erosivos envolvidos em seu desenvolvimento e idades de modelamento. Cada uma destas unidades são superfícies que demarcam eventos erosivos atuantes desde o Cretáceo Superior (Ab'Sáber e Bigarella, 1961).

A superfície mais antiga, denominada “Superfície do Purunã”, configura um pediplano denominado “Pd₃” (Ab'Sáber e Bigarella, *op cit*). Pediplanos retratam produtos erosivos em clima árido equivalente aos “peneplanos” de climas úmidos. Consistem em leques aluviais e superfícies de “*playa*” bem como pedimentos. Implica tanto em erosão como em sedimentação (Strahler, 1970). Os pediplanos são entidades geomorfológicas que representam extensas superfícies de erosão derivadas da coalescência de pedimentos (Bigarella *et al.*, 1965). Pedimentos são termos geomorfológicos de caráter descritivo e genético. Definem aplainamentos no sopé de áreas montanhosas desérticas, modelados pela ação combinada de intemperismo e transporte, gerando superfícies suavemente inclinadas com cobertura de detritos, interrompidos por elevações esparsas (Bryan 1922 *apud* Bigarella *et al.*, 1965). São encontrados no sopé de maciços ou

embutidos em vales (Bigarella *et al.*, 1965). A “Superfície do Purunã” foi definida na serra homônima, nas bordas da Bacia do Paraná, onde atinge altitudes de 1200m (Ab’Sáber e Bigarella, *op cit*). No entanto, não se limita à escarpa de São Luis do Purunã, havendo registros de remanescentes desta superfície em maciços da Serra do Mar, com altitudes entre 1400 e 1500m (Ab’Sáber e Bigarella, *op cit*). Esta superfície estendia-se em direção à Serra do Mar, recobrimdo o primeiro planalto paranaense, tendo sido retrabalhada por sucessivos aplainamentos que promoveram seu recuo até a situação atual.

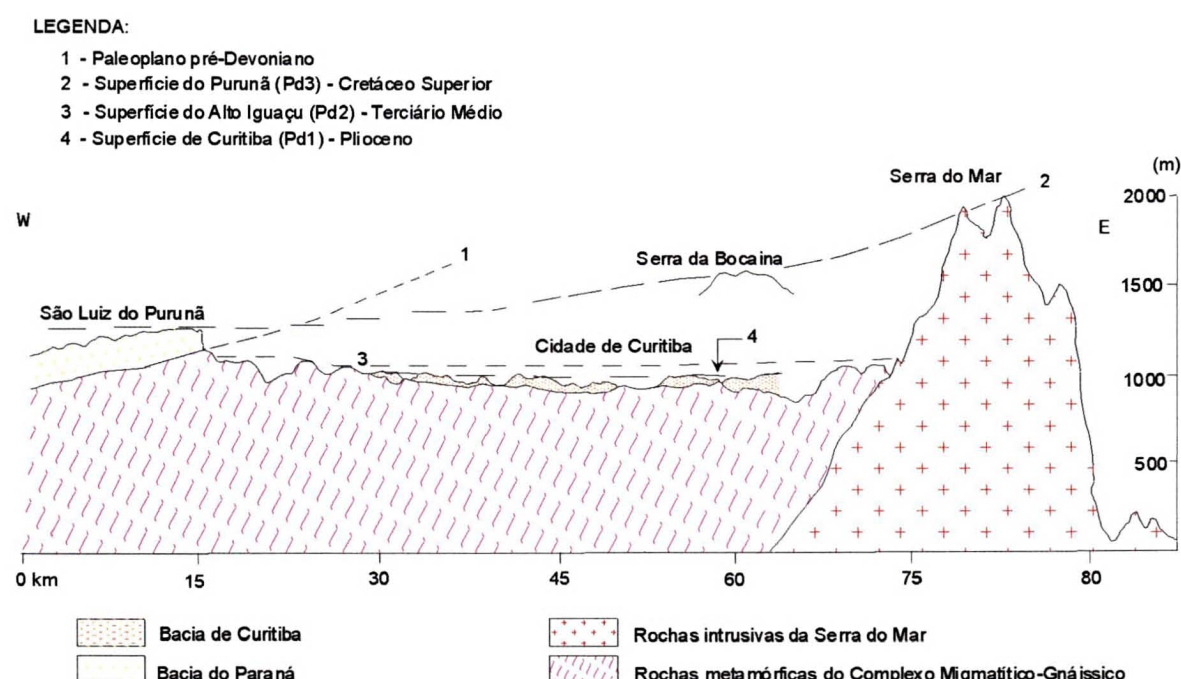


Figura 9 - Compartimentação geomorfológica do primeiro planalto paranaense (modificado de Ab’Sáber e Bigarella, 1961).

Um evento erosivo, atuante sobre a superfície “Pd₃” no Terciário Médio (Bigarella *et al.*, 1965), promoveu a dissecação deste compartimento originando um novo pediplano denominado “Superfície do Alto Iguaçu”, conforme indicado na figura 9 (Almeida, 1955 *apud* Ab’Sáber e Bigarella, *op cit*). Esta superfície, também denominada “Pd₂”, está embutida entre as escarpas da “Superfície do Purunã” e da Serra do Mar (Bigarella *et al.*, 1961), representando uma superfície intermontana ou interplanáltica (Ab’Sáber e Bigarella, *op cit*). Durante o desenvolvimento do “Pd₂”

predominaram processos de pediplanação exorréica, desnudando rochas pré-cambrianas (Ab'Sáber e Bigarella, *op cit*). Alternâncias climáticas, úmidas e secas, geraram níveis de pedimentos embutidos entre os pediplanos Pd₃ e Pd₂ (Bigarella *et al.*, 1965).

A superfície do Alto Iguaçu apresenta relevos residuais, ao norte de Curitiba (Ab'Sáber e Bigarella, *op cit*), representados por colinas quartzíticas caracterizadas como *hogbacks* (Bigarella *et al.*, 1961). Esta superfície alcança altitudes entre 970m (Ab'Sáber e Bigarella, 1961) e 1000m a 1100m. Atualmente a superfície "Pd₂" configura restos de planaltos dissecados (Canali e Muratori, 1981) pela atuação de processos erosivos que movimentaram sedimentos até vales próximos, tornando-os fonte para o preenchimento sedimentar da Bacia de Curitiba (Bigarella e Mousinho, 1965; Ab'Sáber e Bigarella, 1961; Canali e Muratori, 1981; Bigarella *et al.*, 1965).

O novo ciclo erosivo atuante a partir do Plioceno (Canali *et al.*, 1981), sobre a superfície do Alto Iguaçu produziu um novo pediplano denominado "Superfície de Curitiba" ou "Pd₁" (figura 9) (Ab'Sáber e Bigarella, 1961). Similar ao "Pd₂", esta superfície também é classificada como intermontana ou interplanáltica. O processo de modelização do Pd₁ escavou o pediplano Pd₂ através de drenagens dendríticas em clima úmido e definiu as plataformas de interflúvios mais elevadas da Bacia de Curitiba (Ab'Sáber e Bigarella, 1961). A superfície Pd₁ é definida como um pediplano formado por uma faixa de pedimento rochoso que evoluiu para um pedimento detrítico em direção aos baixos vales da Bacia de Curitiba (Bigarella *et al.*, 1961). Atinge altitudes entre 950 a 1000m (Canali *et al.*, 1981). A pediplanação endorréica que gerou a superfície de Curitiba entalhou vales produzindo terraços em alvéolos, calhas aluviais e planícies alveolares tanto nos bordos da bacia como em morros contíguos (Ab'Sáber e Bigarella, 1961).

A evolução da Superfície de Curitiba registrou uma mudança climática acentuada de clima úmido para semi-árido, a qual parece estar bem documentada. A interrupção do processo intempérico e erosivo, que atuava sob clima úmido, impediu o aperfeiçoamento do "Pd₂", mas foi suficiente para gerar espesso regolito. Sob clima semi-árido sucederam novos processos, como intemperismo mecânico e

erosão sob chuvas torrenciais em períodos definidos. Leques aluviais movimentaram o regolito desenvolvido, preenchendo os amplos vales construídos pela drenagem de clima úmido (Bigarella *et al.*, 1965).

A morfologia atual da Superfície de Curitiba demonstra evidências de dissecação ao longo de todo o seu perfil, revelando vales com rebaixamentos de poucas dezenas de metros (Fontana, 1988). Apresenta amplas colinas com topos suavizados, perfazendo uma sucessão de patamares com altitudes variando entre 960 a 870m e declividades não superiores a 6%. As encostas são assimétricas, onde talwegues separam pedimentos de modo a produzir vertentes com declividades entre 20 a 45% (Canali e Muratori, 1981).

Uma outra compartimentação, empregada para descrever o relevo do primeiro planalto, considera preferencialmente aspectos geológicos. As divisões se relacionariam a três principais unidades estratigráficas da região: Grupo Açungui/Setuva; Complexo Pré-Setuva e Depósitos Holocênicos (Salamuni, 1981).

Na unidade geológica correspondente aos Grupos Açungui/Setuva, situados a norte e noroeste da cidade de Curitiba, o relevo é montanhoso com sucessão de vales alongados e cristas estreitas com sentido espacial definido, ora para NE-SW, ora para NW-SE, derivados do intemperismo diferencial sobre litologias de competências diversas. A drenagem é subsequente retangular a sub-retangular. Este padrão sofre mudanças sobre intrusões graníticas onde a drenagem é dendrítica e o relevo, sobre rochas carbonáticas, passa a apresentar dolinamento típico de morfologia cárstica (Salamuni, *op cit*). O Complexo Pré-Setuva desenvolve uma paisagem de “Mar de Morros”, com vertentes convexas, drenagem dendritificada e vales assimétricos (Salamuni, *op cit*).

Bastante diverso dos anteriores, o relevo dos depósitos holocênicos, onde se encontra a cidade de Curitiba, é muito menos energético, apresentando uma predominância de colinas suavemente arredondadas e entremeadas por amplas planícies de inundação (Salamuni, *op cit*).

Na verdade, a associação de formas de relevo com características geológicas do substrato, contribuem para explicar o modelado, mas são insuficientes, se consideradas isoladamente, para descrever a sucessão dos ciclos

geomorfológicos que organizaram as superfícies de aplainamento, as quais representam a paisagem atual.

A evolução geomorfológica, em curso, da “Superfície de Curitiba” aponta para o desenvolvimento da bacia do rio Ribeira e das drenagens associadas a Serra do Mar em direção a bacia do Alto Iguaçu. Segundo Ab’Sáber e Bigarella (1961), “... *alguns ramos das drenagens atlânticas do leste (baías costeiras) e do norte (Ribeira) estão atingindo atualmente áreas oriundas da pediplanação curitibana*”. Este fenômeno, recentemente constatado também por Lisboa (comunicação pessoal, 1996) ao norte de Curitiba, tem reflexos no fluxo das águas subterrâneas.

A superfície potenciométrica dos aquíferos, da área envolvida nesta pesquisa, demonstra que as zonas de descarga se dividem a partir do centro da bacia sedimentar de Curitiba, em parte dirigida para o rio Iguaçu e em parte direcionada para a bacia de drenagens do rio Ribeira, diferentemente do fluxo superficial (Nogueira F^o. *et al.*, 1996).

Não é objeto deste estudo compreender as razões do fenômeno geomorfológico que está se processando através do envolvimento da bacia hidrográfica do Alto Iguaçu pela bacia do Ribeira e das demais ligadas à Serra do Mar. No entanto, estes processos que estão se desenvolvendo, transformando lentamente a paisagem atual, tem reflexos no comportamento da água subterrânea, pois existem relações de dependência entre as formas de relevo, as características geológicas do substrato e o fluxo das águas subterrâneas.

A evolução geomorfológica do relevo, da área em estudo, favoreceu sobremaneira o fluxo de águas subterrâneas na região, pois, na medida em que a superfície Pd₃ foi sendo erodida e a superfície Pd₂ construída, as rochas cársticas do Grupo Açungui, Setuva e pré-Setuva, localizadas a norte da cidade, em cotas situadas em torno de 1200m, foram sendo expostas, submetendo-as aos processos de intemperismo, intensificando o fenômeno da carstificação.

Este fenômeno incrementou a reservação de água subterrânea, em terrenos de cotas mais elevadas, ao norte da cidade de Curitiba, favorecendo a circulação de água em sistemas aquíferos, situados a jusante, no baixo vale do Alto

Iguaçu, através da conexão por sistemas de fraturas em rochas cristalinas e por fraturas associadas a diques básicos os quais recortam, longitudinalmente, tanto rochas carbonáticas da província cárstica como migmatitos e gnaisses do Embasamento Cristalino.

O evento erosivo sobre a superfície Pd₂, bem como a construção do "Pd₁" e o preenchimento da bacia sedimentar de Curitiba, produziram rebaixamentos do relevo sobre a área de estudo e a geração de lentes de arcósios, aquíferos da Formação Guabirotuba.

3 - CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1 ASPECTOS REGIONAIS

A área, em estudo, ocupa pequena porção de uma faixa onde se alinham extensas estruturas geológicas regionais (figura 2). Esta zona bordeja a área continental emersa, aflorante entre a Bacia Sedimentar do Paraná e o Oceano Atlântico. Tais estruturas são ressaltadas em superfície por controlar a geometria de diversos conjuntos de rochas ígneas, metavulcânicas e metassedimentares. Este controle decorre de eventos tectônicos sucessivos, desenvolvidos desde o Proterozóico e que moldaram as unidades preexistentes, estirando-as, principalmente na direção N30-60E. Esta faixa é denominada “Faixa Móvel Ribeira” ou “Faixa de Cisalhamentos Ribeira”.

A faixa de estiramentos e descontinuidades representa uma zona de fraqueza crustal, uma vez que os sistemas de falhamentos aprofundam-se até a proximidade da base da crosta continental (figura 10). Aparentemente, esta faixa permaneceu atuante durante o Mesozóico, quando se iniciou a separação entre os continentes Sul-americano e Africano. Conforme o processo de rifteamento evoluía, aquela zona, perpendicular às forças de distensão, funcionava como superfície de ajuste às tensões atuantes (Macedo, *op cit*). Ao longo deste processo, diversos fenômenos se sucederam gerando feições estruturais que transformaram-se em expressivas entidades geomorfológicas.

Sobre a plataforma continental, mas em áreas atualmente submersas, o estiramento crustal gerou bacias sedimentares marginais, como as Bacias de Pelotas, Santos, Campos, etc., já no Cretáceo (Chang *et al.*, 1990). Durante o desenvolvimento do rifteamento e abertura do Oceano Atlântico, grandes blocos crustais foram soerguidos, em estágios sucessivos, favorecendo o surgimento da Serra do Mar, ao longo da costa atlântica, bordejando o flanco sudeste da “Faixa de Cisalhamentos Ribeira” (Melo *et al.*, 1985).

No período Terciário, a movimentação ao longo de falhas transcorrentes da “Faixa de Cisalhamentos Ribeira” permitiu o surgimento de bacias sedimentares em estilo *pull-apart* (Macedo, *op cit*), originando diversas sinéclises

alongadas paralelamente à faixa de cisalhamento. A bacia de Taubaté e de Resende estão especialmente controladas pelo *trend* e, também, de forma menos notável, as bacias de São Paulo e de Curitiba.

A separação entre as placas Sul-americana e Africana parece ter gerado ainda, uma zona de falhas de transferência, que ocorre desde a bacia de Santos, passando pela Serra do Mar, pela Bacia de Curitiba e desaparecendo sob os sedimentos da Bacia do Paraná. Paralela a esta zona de transferência, está alinhado grande parte do curso do rio Iguaçu, no sentido E-W, (Macedo, *op cit*).

As estruturas proeminentes da Faixa Ribeira parecem ter atuado durante diversos eventos tectônicos, na estruturação desta porção do bloco continental, permitindo a movimentação de maciços, conforme a ação das tensões atuantes.

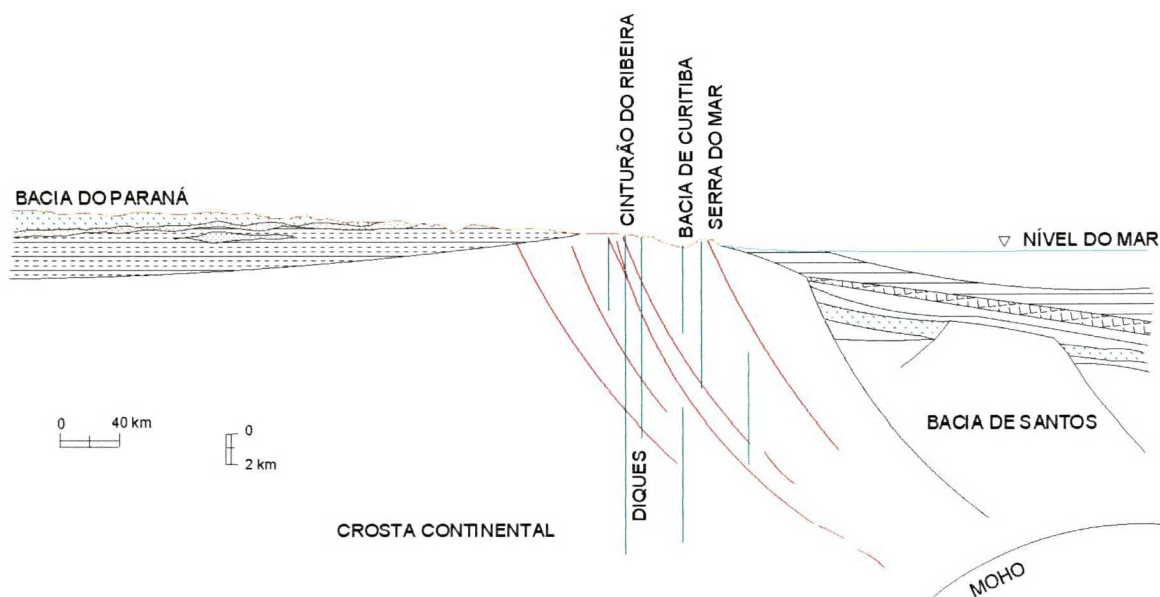


Figura 10 - Seção geológica regional (modificada de Macedo, 1990) mostrando a extensão teórica das descontinuidades regionais associadas ao Cinturão Ribeira.

De maneira diversa, às direções predominantes na faixa da Ribeira, um outro evento tectônico, no Mesozóico, também relacionado à separação dos continentes, imprimiu feições diferenciadas ao contexto geológico e que atualmente se revelam de grande importância para a pesquisa da água subterrânea. No Juro-Cretáceo, associado a um adernamento crustal que originou o Arco de Ponta

Grossa, ocorreram inúmeras intrusões de rochas básicas, as quais se alojaram em fraturas abertas no sentido NW-SE (Soares *et al*, 1983). Este evento representa a paralisação de um processo de rifteamento que se iniciava na região (Macedo, *op cit*). As intrusões se configuram em diques básicos (figura 2), que apresentam formato tabular, com extensões quilométricas, diminuta amplitude lateral, grandes profundidades e mergulho subvertical. Eventualmente, estão seccionados por sistemas de fraturas.

O substrato geológico ao redor das bacias terciárias, é constituído por complexos metassedimentares, ocasionalmente intrudidos por maciços cristalinos, e pelo embasamento destes, representado por rochas gnáissico-migmatíticas arqueanas a proterozóicas.

Dentro deste contexto, os lineamentos, no entorno da área estudada, associam-se às estruturas regionais. Os traços estruturais reconhecidos sobre as principais drenagens (figura 7) denotam, à noroeste da figura, uma porção onde os cursos d'água alongam-se para NE-SW e integram parte da “Faixa de Cisalhamento Ribeira” (figura 2) que desaparece sob a Bacia do Paraná. Na região central (figura 7), as drenagens ressaltam, de maneira menos evidente, a intensidade dos traços estruturais, em função da presença de rochas do Complexo Migmatítico-Gnáissico, menos susceptíveis que os metassedimentos às deformações. Na porção leste e sudeste, as drenagens, próximas à Serra do Mar, alinham-se principalmente na direção NW-SE. Na região sul, próximo à área de estudo, as drenagens alinham-se segundo a direção N-S e no setor nordeste, as drenagens apontam ou para E-W, ou para NE-SW. A principal drenagem da região, o rio Iguaçu, apresenta nítido controle estrutural, iniciando seu percurso, segundo a direção NE-SW, típica da Faixa de Cisalhamento Ribeira para, em seguida, infletir para E-W, até as proximidades das escarpas da Bacia do Paraná. Esta última direção é menos proeminente na Faixa Ribeira, mas parece controlar importantes feições geomorfológicas e encontra-se rastreada além dos limites aflorantes da Faixa Ribeira (Macedo, *op cit*).

Os resultados obtidos neste estudo, ressaltaram, especialmente em modelos digitais de terreno (ver capítulo 7), a ocorrência de traços estruturais na direção E-W, os quais são pouco salientes em imagens óticas.

3.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS RESTRITOS À ÁREA DE ESTUDO

Dentro dos limites da área de estudo, afloram rochas cristalinas do Complexo Migmatítico-Gnáissico. Justapostas a estas, por falhamentos, no extremo noroeste da área, ocorrem rochas metassedimentares. Seccionando estas litologias observam-se diversos corpos intrusivos de rochas básicas. Recobrindo, de maneira descontínua, os estratos anteriores, encontram-se sedimentos da Bacia de Curitiba. Como registro geológico mais recente, ao longo das principais drenagens da área, há sedimentos inconsolidados de depósitos aluvionares quaternários (figura 11).

3.2.1 COMPLEXO MIGMATÍTICO-GNÁISSICO

São rochas que constituem o substrato da região e representam o embasamento cristalino. Datadas entre o Arqueano e o Proterozóico Inferior, envolvem migmatitos estromáticos com paleossoma de biotita-hornblenda-gnaiss, mica-quartzo-xisto, ultrabásito e anfibolito, migmatitos oftálmicos com paleossoma de biotita-gnaiss, biotita-hornblenda-gnaiss e hornblenda-gnaiss, com quartzitos locais (CPRM, 1986). Apresenta-se recortado por sistemas de fraturamentos, superimpostos e intrudidos por diques de diabásio do Mesozóico.

3.2.2 COMPLEXOS METASSEDIMENTARES

Ocorrem apenas na região noroeste da área, no bairro da Lamenha Pequena. São rochas da Formação Capiú, do Grupo Açungui, do Proterozóico Superior. São compostos por metassedimentos siltico-argilosos incluindo filitos e metarritmitos (CPRM, 1986).

Estas rochas estão afetadas por dobramentos regionais e apresentam superfícies de clivagem derivadas daqueles eventos. Estão justapostas às rochas do Embasamento Cristalino por zonas de falhas transcorrentes.

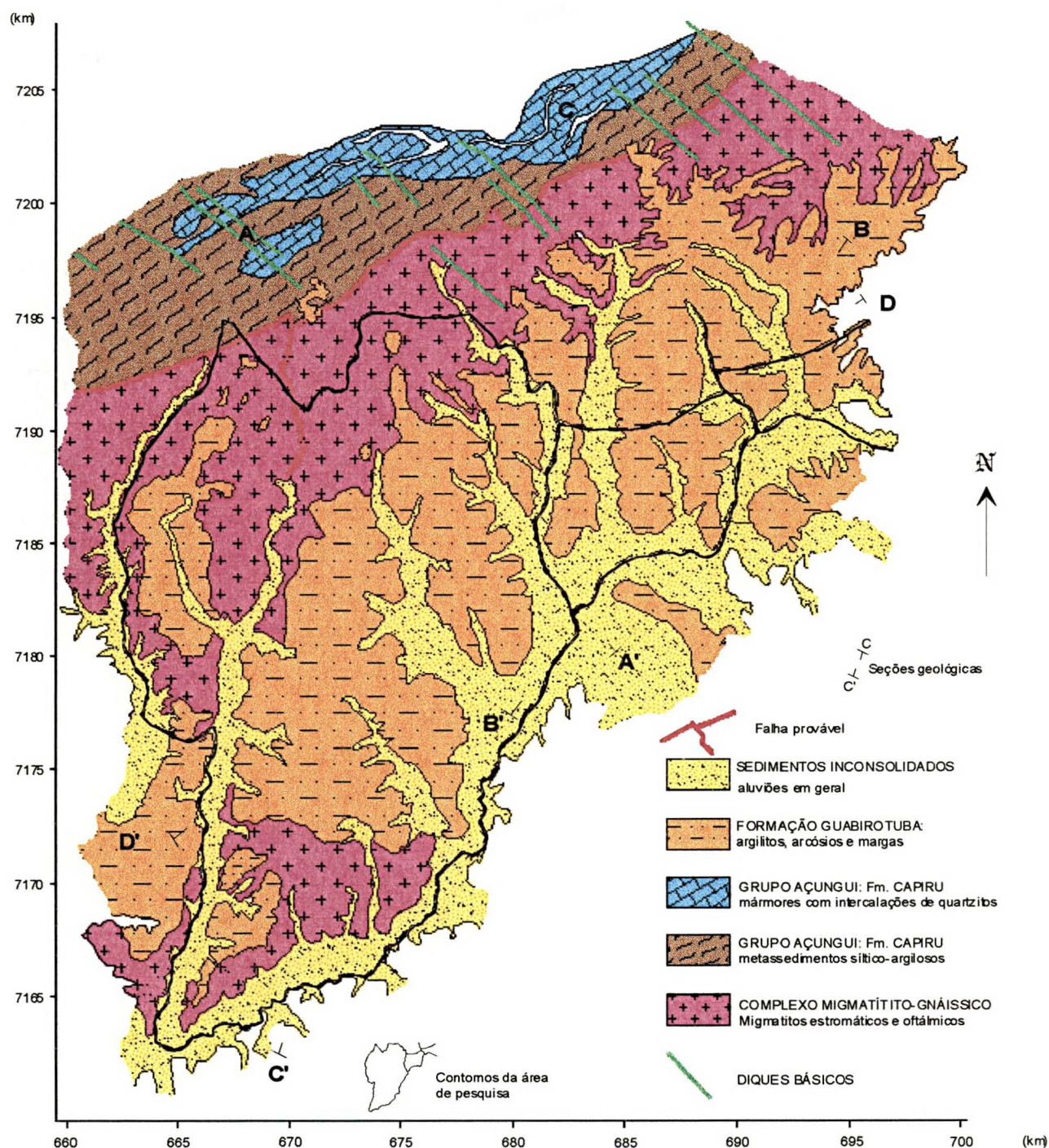


Figura 11 - Mapa geológico da área investigada (modificado de CPRM, 1986) - coordenadas em UTM.

3.2.3 DIQUES DE DIABÁSIO

São corpos intrusivos de rochas básicas, que seccionam as rochas metassedimentares e cristalinas do embasamento, na direção N30-60W. Representam a inserção de magma básico em fraturas preexistentes ou que se formaram durante o evento de espessamento crustal, sendo, portanto, alongados. As fraturas ocupadas pelos diques são profundas por estarem relacionadas a processos tectônicos que envolveram o manto superior (figura 10).

Os diques de diabásio concentram-se na porção meridional da Faixa de Cisalhamentos Ribeira e estendem-se, paralelamente, concentrados próximos ao Arco de Ponta Grossa na Bacia do Paraná.

Petrograficamente, os diques são constituídos por basaltos, diabásios, gabros e dioritos pórfiros (CPRM, *op cit*). Eventualmente, estão recortados por sistemas de fraturamentos.

3.2.4 BACIA SEDIMENTAR DE CURITIBA

A Bacia de Curitiba é uma entidade geológica de origem tectônica, desenvolvida no Terciário (Ab'Saber e Bigarella, 1961). Ocupa uma área de 3.500km² (Fortin, 1989), apresenta geometria alongada na direção NE-SW, concordante com a direção estrutural principal da "Faixa de Cisalhamento Ribeira". As rochas sedimentares que preenchem esta bacia estão agrupadas na Formação Guabirota. A espessura desta unidade não ultrapassa 100m.

3.2.4.1 FORMAÇÃO GUABIROTA

É constituída por argilitos, arcósios, margas, areias e cascalhos. Os argilitos são predominantes em toda a seção e estão intercalados por lentes de arcósios (figura 12). Apresentam argilas montmoriloníticas e intercalam-se com pacotes de argilas mais e menos arenosas. Os arcósios possuem granulometria grosseira, são sub-angulosos e apresentam coloração esbranquiçada a rosada. Localizadamente ocorrem concreções de carbonatos, descritas como depósitos de *sabkas* (Bigarella *et al.*, 1961).

As lentes de arcósio mostram distribuição espacial esparsa em meio às argilas e verticalmente sucedem-se ao longo do perfil, com espessuras centimétricas. Lentes de arcósios de maiores dimensões, com valores máximos de até vinte metros (Parque Castelo Branco), ocorrem, especialmente na base da unidade, junto ao contato com o Embasamento Cristalino.

3.2.5 DEPÓSITOS ALUVIONARES

São sedimentos inconsolidados depositados ao longo das principais drenagens da região, formados predominantemente por argilas acinzentadas. Estas, a partir da superfície, apresentam um primeiro horizonte com argilas negras, ricas em matéria orgânica, sucedida por argilas sílticas e siltico-argilosas, esbranquiçadas. Intercalados a estes pacotes de argilas existem bolsões de areias grosseiras, centimétricos a métricos, de coloração esbranquiçada a acinzentada e de composição quartzosa.

Estes depósitos aluvionares assentam-se, na maioria das vezes, sobre os sedimentos da Formação Guabirotuba, ou diretamente sobre rochas cristalinas do embasamento. Apresentam espessura máxima de 7,5m, dentro da área de estudo (COMEC, 1996).

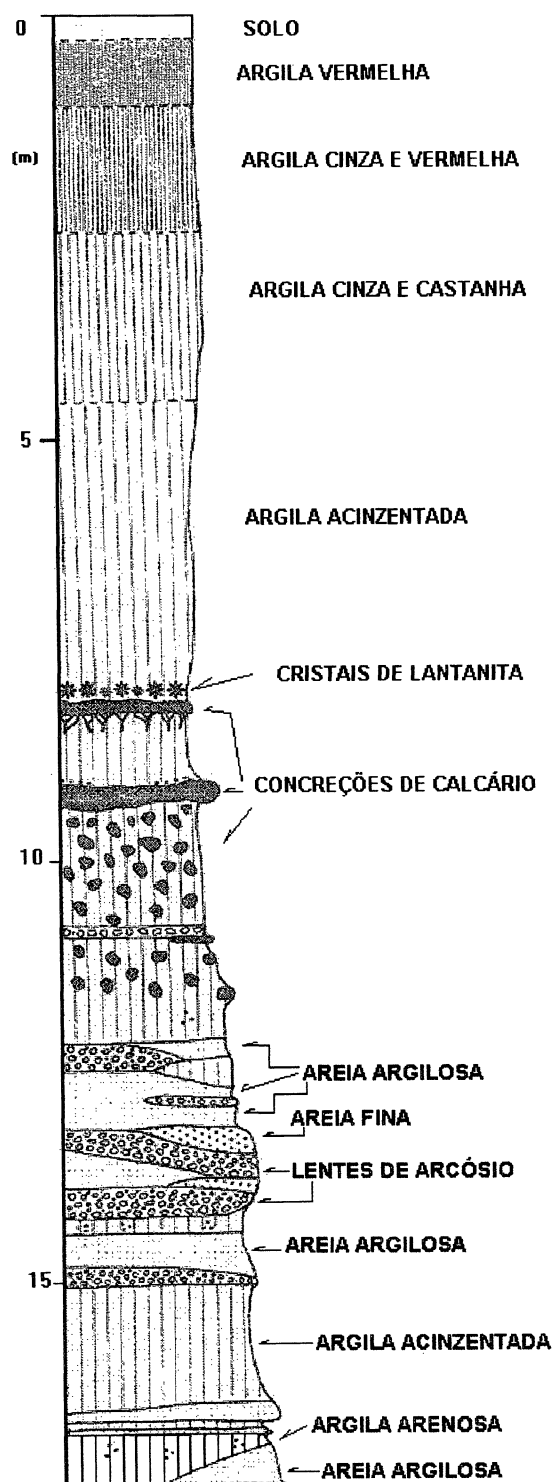


Figura 12 - Seção geológica esquemática, mostrando a distribuição vertical dos sedimentos da Formação Guabirotuba (Fortin, 1989).

4 - AQUÍFEROS DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 DEPÓSITOS ALUVIONARES RECENTES

O estudo destes aquíferos não foi alvo deste trabalho de pesquisa.

Os depósitos aluvionares, na área de pesquisa, com potencial para água subterrânea, estão associados especialmente ao rio Iguaçu. São considerados aquíferos, naqueles depósitos, apenas os horizontes de areias grosseiras, sendo o restante formado por camadas argilosas.

Os aquíferos aluvionares são do tipo livre (Rocha, 1996) e estão distribuídos irregularmente ao longo de todo o curso do rio Iguaçu. As áreas de ocorrência são facilmente identificáveis devido à atividade de mineração, a qual historicamente tem removido os depósitos de areias, não apenas na superfície do canal do rio, como também nos depósitos aluvionares, junto às suas margens. A remoção destes bolsões de areia resultaram em vazios, os quais, por encontrarem-se abaixo do nível freático, permanecem inundados. Em decorrência a paisagem, ao longo dos aluviões, apresenta diversas “cavas” saturadas em água. A disposição destes lagos mostra a distribuição espacial dos aluviões e, conseqüentemente, dos aquíferos.

Os depósitos de areia, ainda existentes ao longo dos aluviões do rio Iguaçu, bem como as cavas, constituem reservas de água possíveis de utilização para consumo da população. Cálculos efetuados apenas no aluvião junto ao rio Pequeno (afluente do rio Iguaçu), considerando-se tanto as cavas, que atualmente são lagos superficiais, como os aquíferos ainda existentes, apontam reservação da ordem de $4.048.335\text{m}^3$, sendo permissível de extração, vazões da ordem de 364 l/s (Rocha, 1996).

Em poços tubulares, as vazões alcançam a ordem de $40\text{ m}^3/\text{h}/\text{poço}$ (Lisboa, 1996, comunicação pessoal). A profundidade média dos aluviões situa-se em torno de cinco metros (COMEC, 1996). A recarga destes aquíferos é realizada principalmente por água de chuva e também pela relação de troca que mantém com o canal dos rios, ora recebendo água, ora alimentando as drenagens (Lisboa, 1996, comunicação pessoal).

As águas dos aquíferos aluvionares desta região, por se tratarem de aquíferos livres e de localizarem-se em meio a área de descarga dos principais cursos d'água, os quais drenam áreas densamente povoadas, podem apresentar índices de potabilidade inadequados para consumo *in natura*. Fato que diante da elevada reservação e proximidade com as áreas de consumo não deixam de caracterizá-los como potencialmente importantes para abastecimento da população de Curitiba e região metropolitana.

4.2 LENTES ARCOSEANAS DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA

Os aquíferos da Formação Guabirota são do tipo semi-confinado a confinado (ROSA F^o, *et al* 1996) e estão representados exclusivamente por lentes arcóseas ou quartzosas (figura 12, fotos 01, 02 e 03). A favorabilidade destas lentes para circulação e armazenamento de água subterrânea é função direta dos menores teores de argilas e das maiores espessuras das lentes. Testes de vazões em poços tubulares, nestes aquíferos, acompanhados pelo autor, atingiram valores de até 100 m³/h/poço, para profundidades em torno de 50m.

A geometria destes aquíferos está associada à atuação de sistemas deposicionais que operaram à época do preenchimento da bacia sedimentar. Estes processos produziram corpos lenticularizados, de distribuição espacial irregular e que, na maioria das vezes, apresentam espessuras centimétricas.

4.2.1 PARÂMETROS E VARIÁVEIS HIDRÁULICAS

Os objetivos deste trabalho não envolvem a determinação de parâmetros e variáveis hidráulicas, mas a localização espacial e interconecções entre os sistemas aquíferos.

São raras as informações, na literatura, sobre estudos de quantificação de propriedades hidráulicas em lentes de arcóseas da Formação Guabirota.



Foto 01 - Exposição de lente de areia arcossiana em meio a porções de argilas, avermelhadas e intemperizadas, da Formação Guabirotuba. Observa-se possível deslocamento dos horizontes de argila e arcósios, sugerindo fraturas em sedimentos Quaternários. Av. Maringá, Pinhais (fotografado pelo autor).



Foto 02 - Detalhe da foto 01, mostrando contornos da lente arcossiana e detalhes de diferenciação entre argilas e arcósios (fotografado pelo autor).



Foto 03 - Aspecto da fotografia anterior, mostrando detalhes da granulometria dos seixos que compõem os depósitos arcossianos da Formação Guabiruba (fotografado pelo autor).

Alguns estudos realizados em poços tubulares localizados nas imediações do Parque Castelo Branco, no extremo nordeste da área de estudo, revelam os seguintes valores (Rosa F^o., *et al*, 1996) :

porosidade efetiva: 28% a 35%

permeabilidade (k): $1,22 \cdot 10^{-4}$ a $1,96 \cdot 10^{-4}$ m/s

coeficiente de transmissividade (T): $1,0 \cdot 10^{-3}$ a $2,3 \cdot 10^{-3}$ m²/s

coeficiente de armazenamento: $5,4 \cdot 10^{-3}$ a $1,6 \cdot 10^{-5}$

Estes resultados representam realizações amostrais de áreas restritas do aquífero. Até então, somente as área das imediações do Parque Castelo Branco foram alvo de pesquisas sobre os aquíferos relacionados às lentes de arcósio. Dados de perfuração de poços tubulares demonstram a sucessão destas lentes ao longo da Bacia de Curitiba. Resultados interessantes ocorrem, especialmente, em poços situados no Parque Tomaz Coelho, no município de Araucária, no extremo

SW da área de pesquisa, onde a espessura das lentes se assemelha às do Parque Castelo Branco.

A título de caracterização genérica do aquífero, a recarga das lentes arcossianas parece ocorrer através das seguintes formas:

- diretamente pelas lentes, quando existem extremidades próximas à superfície;
- através de transmissão lenta de água pelas argilas que as circundam. Esta informação está apoiada em dados geoquímicos, que apontam enriquecimento em íons derivados de argilas montmoriloníticas, típicas da Formação Guabirotuba (Nogueira e Bittencourt, 1995);
- através de sistemas de fraturas que recortam os sedimentos da Formação Guabirotuba, desde a superfície (foto 01).
- através de sistemas de fraturas de rochas do Complexo Migmatítico-Gnáissico, que constituem o embasamento dos sedimentos da Formação Guabirotuba.

4.3 - DIQUES DE DIABÁSIO

Particularidades relacionadas ao fenômeno gerador das intrusões básicas induziram o preenchimento de zonas de falhas na direção noroeste, de maneira a configurar corpos tabulares, alongados de extensões quilométricas e dimensões de dezenas a centenas de metros em profundidade. Litologias que compunham o substrato da região no período Juro-Cretáceo foram seccionadas indistintamente através da intrusão das rochas básicas.

Na região estão intrudidos tanto em rochas cristalinas do Complexo Migmatítico-Gnáissico como em metapelitos e rochas metacarbonáticas (figura 11).

As intersecções de diferentes litologias configuram interconecções entre diferentes sistemas aquíferos. Os sistemas aquíferos cársticos abrigados em metacarbonatos do Grupo Açungui situados a montante dos sistemas de fraturas das rochas cristalinas do Complexo Migmatítico-Gnáissico estão indistintamente intrudidos por diversos diques de diabásio que se estendem entre uma litologia e outra (figura 11).

Apesar de representarem um meio quase impermeável e de preencherem fraturas preexistentes os diques de diabásio não vedam os condutos,

pois por representarem material isotrópico de competência diferente do das paredes das encaixantes, tornaram-se, através de reativações das zonas de falhas, fraturados ao longo de sua extensão e localizadamente cominuídos permitindo a circulação de água, especialmente ao longo dos flancos dos diques.

É possível ilustrar as afirmações acima através do relato da perfuração do poço tubular localizado na rua Vicente Machado, 2765, bairro Batel, em Curitiba, a qual foi acompanhada pelo autor. Aos 26,0m, após transpor a coluna de sedimentos siltico-argilosos da Formação Guabirota, observou-se a intersecção de rochas migmatíticas do Embasamento Cristalino, por rocha ígnea máfica, inalterada, configurando um dique de diabásio, o qual já era esperado em função de aspectos geológicos e geomorfológicos superficiais da área.

Apesar da perfuração ter-se realizado através do sistema roto-pneumático, a amostragem recuperada em superfície permitiu identificar facetas estriadas em amostras centimétricas, atestando microfraturas naquelas rochas. Desde os 26,0 perfurou-se somente em diabásio, com mínima entrada d'água proveniente da zona de contato entre sedimentos e embasamento cristalino. Entretanto, aos 114,0m, transpô-se a rocha básica e no contato com a encaixante de rochas migmatíticas atingiu-se a mais importante entrada d'água do poço, com vazão de 3,5 m³/h.

O exemplo ilustra a existência do conduto em meio fraturado entre as paredes do dique e a encaixante por intermédio da qual ocorre o fluxo de água subterrânea.

Diversos exemplos similares estão documentados na área de pesquisa, cita-se o poço do Condomínio Resort (Acquasul Poços Artesianos) na cidade de Piraquara (Região Metropolitana de Curitiba) e estudos geofísicos sobre a percolação de chorume em fraturas de diques de diabásio no Lixão da Lamenha Pequena no extremo noroeste de Curitiba (COMEC, 1995).

Outros indícios de fluxo subterrâneo entre aquíferos fraturados por intermédio dos diques pode ser aventado pelo exame de dados hidroquímicos (Nogueira Fº. e Bittencourt, 1995). Em diagramas de Piper observou-se surpreendente enriquecimento em íons HCO₃⁻ em águas dos aquíferos fraturados de

rochas migmatíticas, com tendência inclusive para o fácies definido para águas exclusivamente dos aquíferos cársticos (Nogueira Fº. e Bittencourt, *op.cit.*).

4.4 SUPERFÍCIE DE CONTATO ENTRE OS SEDIMENTOS DA BACIA DE CURITIBA E ROCHAS DO EMBASAMENTO CRISTALINO

Os resultados observados durante o acompanhamento da perfuração de diversos poços tubulares, bem como dados históricos tabulados de perfurações na área de estudo, sugerem que a superfície existente entre a base dos sedimentos da Bacia de Curitiba e as rochas do Embasamento Cristalino (foto 04 e 06), permitem a circulação de água subterrânea. Entretanto, este meio raramente é aproveitado em poços tubulares por apresentar vazões reduzidas.



Foto 04 - Zona de contato entre os sedimentos arcossianos da Formação Guabirotuba e migmatitos intemperizadas do embasamento cristalino. Observam-se os seixos esbranquiçados dos arcósios e a foliação metamórfica dos migmatitos. Bairro do Atuba, proximidades da pedreira do Atuba, Curitiba, Pr.

Os resultados obtidos com o tratamento dos dados, realizados neste trabalho, parecem indicar que esta superfície, em função da continuidade espacial e também por estar relacionada ao *trend* tectônico que controla a região, induz direções preferenciais ao fluxo subterrâneo.

4.5 COMPLEXO MIGMATÍTICO-GNÁISSICO

As rochas desta unidade (foto 05) são muito pouco propícias para a circulação de água subterrânea, por possuírem porosidade natural muito reduzida. Entretanto, as características abaixo permitem a existência de aquíferos:



Foto 05 - Exposição de migmatitos do Complexo Migmatítico-Gnáissico. Observam-se sistemas de fraturas seccionando as rochas. Estes, em profundidade, permitem a circulação da água subterrânea (pedreira do Atuba, Curitiba, Pr).

- são rochas que apresentaram comportamento rúptil ao longo de diversos ciclos tectônicos fanerozóicos. Estes eventos geraram porosidade secundária, através de descontinuidades estruturais, que permitem a circulação e armazenamento de água subterrânea. Estas descontinuidades possibilitam a comunicação entre diversos sistemas de fraturas, os quais se interceptam em sentido oblíquo, produzindo estruturas bastante favoráveis à circulação e armazenamento de água subterrânea (foto 05);
- a remoção da cobertura de solos e sedimentos ao longo de ciclos erosivos, resultou na produção de sistemas de fraturas por alívio de tensão (foto 06). Esta zona, geralmente limitada ao topo do embasamento, na porção de contato com os sedimentos da Formação Guabirotuba, representa um importante conduto para as águas subterrâneas. Em diversos poços tubulares foram detectadas entradas d'água na porção imediatamente inferior aos sedimentos da Bacia de Curitiba.



Foto 06 - Outro aspecto da exposição de migmatitos do Complexo Migmatítico-Gnáissico. Ressalta-se, próximo ao topo, sistemas de fraturas horizontalizadas, de alívio de tensão. Esta também é uma zona, quando em profundidade, propícia à circulação de água subterrânea e costuma representar entradas d'água em perfurações de poços tubulares (Pedreira do Atuba, Curitiba, Pr). Fotografado pelo autor.

- estão localizadas em uma faixa geológica intensamente deformada ao longo de vários ciclos tectônicos, desde o pré-Cambriano até o presente (Soares, 1992), que geraram importantes transformações como a implantação da Bacia de Curitiba.
- estão recortadas por intrusões básicas profundas, as quais, por suas peculiaridades estruturais parecem favorecer a ligação entre sistemas aquíferos.

As características rúpteis das rochas do Complexo Migmatítico-Gnáissico propiciam a existência de sistemas aquíferos do tipo fraturado, com vazões que oscilam, conforme registros no banco de dados (tabelas 2a a 2g), entre 1,0 m³/h/poço a 100 m³/h/poço e média de 3,5 m³/h.

5 - AQUISIÇÃO, COMPILAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

5.1 DADOS UTILIZADOS

Os dados utilizados na pesquisa foram obtidos, principalmente, a partir de registros de poços tubulares, muitos dos quais tiveram a construção acompanhada pelo autor. Também foram utilizadas informações gravimétricas cedidas pelo Departamento de Geociências da UFPR e dados plani-altimétricos da COMEC (Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba).

A tabulação dos dados de poços tubulares resultou na montagem de planilhas (tabelas 2a a 2g e 3a a 3b) onde estão listadas as diversas variáveis associadas aos aquíferos. Os dados correspondentes à construções não acompanhadas “*in loco*”, foram checados por visita e/ou informações pessoais dos proprietários. No decorrer das verificações, diversas fichas construtivas foram abandonadas, geralmente, por se tratarem de unidades muito antigas, cuja localização se tornou inviável.

Os dados de poços tubulares referem-se a dois sistemas aquíferos: arcósis da Formação Guabirota e fraturas do embasamento cristalino (figura 13).

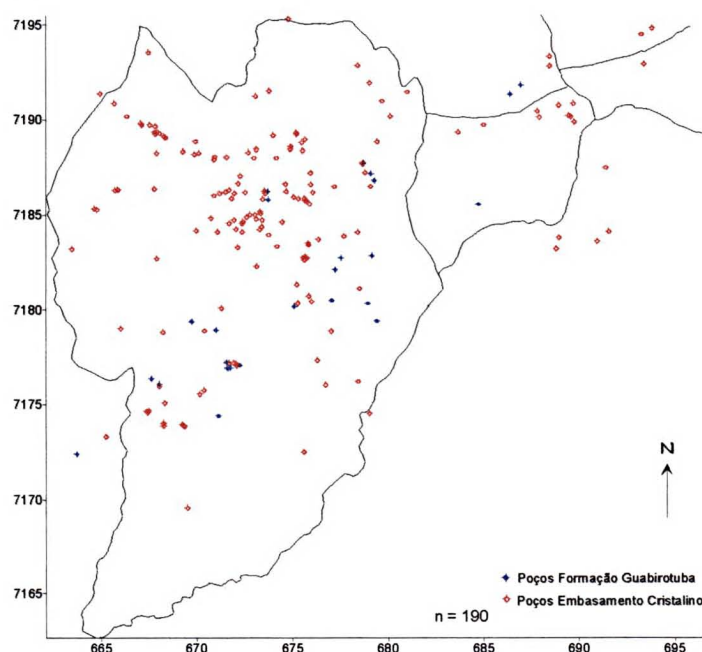


Figura 13 - Distribuição dos poços tubulares cadastrados neste trabalho. Em vermelho, poços que exploram águas de aquíferos fraturados (85,8%); em azul, poços tubulares equipados para explorar aquíferos das lentes arcósis da Formação Guabirota (14,2%). Coordenadas em UTM.

TABELA 2a - DADOS DE POÇOS TUBULARES.

nº	UTM - w	UTM - s	data	altitude	bairro	prof.	vazão	N.D.	N.E.	cota N.E.	solo esp.	rocha alter.	Form. Guab.	altit. cota Fm.Guab	E.A.	cota da E.A.	filtros posição	revest. (m)	Func. atual
	km	km		(m)		(m)	(m³/h)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	esp.(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	
1	663,45	7183,20	Mai/73	935,00	Augusta	115,00	12,00	40,00	10,00	925,00	-	-	(0 - 13)		28; 91	907, (901-897), 844	34 a 38	34,70	
2	663,72	7172,40	?	920,00	Araucária	98,00	1,80	36,00	20,80	899,20	5,00		40	880	(86-87); (36- 40)	834 e 882			
3	664,63	7185,32	Nov/94	940,00	CIC	100,00	2,40	40,15	9,00	931,00			(0-15)		32; 41	908, 899	-	16,00	Ok
4	664,77	7185,28	Mai/95	945,00	CIC	100,00	3,80	70,00	12,00	933,00					35; 44; 66; 78	910, 901, 879, 867	(32-36)	(0-32)	Ok
5	664,93	7191,37	Abr/88	910,00	Sta. Felicidade	39,00	2,50	10,20	9,00	901,00	6,00	(6 - 15)	-		27	883	-	20,80	Ok
6	665,24	7173,34	?	915,00	Araucária	150,00	3,50	63,50	39,20	875,80			33	882	106	809			
7	665,67	7190,87	Out/69	970,00	Sta. Felicidade	70,00	0,80	65,00	2,00	968,00	?		?		filtros		16,3 - 19,9	?	des.
8	665,71	7186,30	?	967,00	Órleans	?	4,00	26,00	6,72	960,28			?		31	936	-	?	Ok
9	665,85	7186,33	?	965,00	Órleans	122,00	2,20	82,69	7,00	958,00	9,00	-	(9 - 21)		?		-	31	Ok
10	665,88	7186,32	?	967,00	Orleans	30,00	3,80	11,14	2,30	964,70	12,00	-			13	954	-	10,00	Ok
11	666,02	7179,01	?	920,00	São Miguel	105,00	2,00	65,00	8,00	912,00	-	-	-		?		-	27,5	Ok
12	666,34	7190,20	Out/69	983,00	Sta. Felicidade	60,00	0,00	-	-	?	5,00	(5 - 20)	-		-		-	33,40	improd
13	667,07	7189,83	Mar/70	970,00	Sta. Felicidade	115,00	1,80	54,00	22,00	948,00	-		(0 - 21)		34; 112	936, 858	33 - 35	42,50	
14	667,12	7189,73	Fev/70	970,00	Sta. Felicidade	58,00	0,00	-	-	?	-		(5 - 14)		-		-	-	improd
15	667,38	7174,66	Out/88	886,00	CIC	120,00	3,80	66,50	9,00	877,00	-	-	0 - 29		filtros	(853 - 851)	33 - 35	(0 -33)	Ok
16	667,43	7174,57	Set/88	886,00	CIC	88,00	13,20	45,00	9,00	877,00	-	-	10		filtros	(862 - 858)	24 - 28	(0 - 24)	Ok
17	667,47	7193,54	Nov/91	980,00	Lam. Pequena	27,00	5,50	13,80	10,20	969,80	(0-6)	(12-20)	?		24	956	-	(0-20)	Ok
18	667,49	7174,67	Ago/88	886,00	CIC	104,00	8,80	48,50	25,20	860,80	-	-	21		filtros	(850 - 846)	36 - 40	(0 - 6)	Ok
19	667,53	7189,74	Mar/88	968,00	Sta. Felicidade	60,00	3,80	25,00	7,00	961,00	3,00	-	-		18; 25; 32	943, 936	-	-	Ok
20	667,63	7176,36	Dez/67	892,00	CIC	87,00	2,50	58,00	35,00	857,00	-		(0 - 70)		56; 65; 74	836, 827, 818	55- 58	73,80	
21	667,78	7186,38	Jan/76	940,00	Mossunguê	100,00	6,50	45,00	6,00	934,00	5,00		(5 - 15)		56; 95	884, 845	19 a 23	39,00	
22	667,79	7189,36	Fev/88	960,00	Sta. Felicidade	69,00	1,50	20,00	1,00	959,00	7,00	(7-16)	-		11; 13	freático	(11 - 13)	(0-11)	Ok
23	667,83	7189,67	Jul/94	960,00	Sta. Felicidade	123,00	1,39	47,04	29,00	931,00	(0-9)		(9-12)		119	841	-	(0- 19,3)	Ok
24	667,83	7189,25	?	960,00	Sta.Felicidade	60,00	1,00	18,00	3,00	957,00	5,00	(5-11)	-		18	freático	-	10,00	Ok
25	667,91	7182,71	Jun/72	945,00	C. Comprido	87,00	12,00	45,00	12,00	933,00	27,00	?	-		70; 87	875, 858	12; 16		
26	667,91	7188,26	Mai/91	950,00	Sta. Felicidade	50,00	0,50	12,50	3,80	946,20	6,00	(6-12)	-				(10 - 12)	(0-10)	
27	667,93	7189,37	?	960,00	Sta. Felicidade	96,00	4,50	42,00	18,00	942,00	3,00	(12 - 21)	-		52; 61; 75; 85; 91	908,899,885,8 75,869	-	21,00	Ok
28	668,04	7176,07	Jun/78	890,00	CIC	73,00	24,80	33,00	6,00	884,00	-	?	(0 - 30)		31; 41; 48	859, 849, 842	29; 33		

TABELA 2b - DADOS DE POÇOS TUBULARES (CONTINUAÇÃO).

nº	UTM - w	UTM - s	data	altitude	bairro	prof.	vazão	N.D.	N.E.	cota N.E.	solo	rocha	Form.	altit. cota	E.A.	cota da E.A.	filtros	revest.	Func.
	km	km		(m)		(m)	(m³/h)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	esp.(m)	Fm.Guab	(m)	(m)	(m)	(m)	
29	668,04	7175,97	Mai/74	890,00	CIC	163,00	14,00	31,00	3,00	887,00	6,00	?	(6 - 28)		71; 112 + fil.	(859-863), 819, 778	31 - 34	46,00	
30	668,06	7189,29	Mar/95	960,00	Sta. Felicidade	63,00	1,70	40,13	6,20	953,80	3,00	(3 - 12)	-		18; 33	freático	(16,5 - 18,5)	16,50	Ok
31	668,23	7178,81	Set/77	892,00	CIC	123,00	9,00	60,00	12,00	880,00	6,00		(6 - 12)		72; 109	820, 783	-	36,40	
32	668,27	7174,05	?	895,00	CIC	110,00	0,00	-	-	?	3,00	-	(3 - 24)		-		-	-	improd
33	668,27	7173,91	?	895,00	CIC	100,00	0,00	-	-	?	2,00		(2 - 24)		-		-	-	improd
34	668,29	7189,12	Mai/70	956,00	Sta. Felicidade	56,00	3,00	40,00	5,00	951,00	5,00	(5 - 20)	-		24; 25	932	23,5 - 25	24,00	
35	668,33	7175,08	?	900,00	CIC	202,00	6,60	62,00	10,00	890,00	-	-	-		35; 44; 137 e 181	65,56,763 e 719	-	44,5	Ok
36	668,37	7189,06	Dez/91	956,00	Sta. Felicidade	156,00	5,14	37,10	30,00	926,00	6,00	-	-		152	804	-	18,00	Ok
37	669,24	7173,98	Dez/78	905,00	CIC	281,00	12,60	83,00	7,00	898,00	6,00		(6-24)	881,00	158; 247	747, 658	-	32,50	Ok
38	669,29	7188,35	Jan/96	930,00	Cascatinha	110,00	13,20	38,00	0,00	930,00	-	-	-		?		-	11	Ok
39	669,32	7173,92	Mar/53	905,00	CIC	50,00	3,10	?	9,50	895,50	4,00	17	-	888,00	-		-	17,00	Ok
40	669,39	7173,89	Ago/78	905,00	CIC	244,00	1,00	50,00	5,00	900,00	6,00	(6 - 24)	-	881,00	240	665	-	27,00	
41	669,52	7169,57	Fev/71	905,00	Xaxim	170,00	8,00	60,00	32,00	873,00	-		(0 - 52)	853,00	?		?	?	Ok
42	669,75	7179,37	Mar/75	915,00	Novo Mundo	144,00	2,20	75,00	35,00	880,00	-		(0 - 51)		113; 115	(883-886), 802, 800	32 - 35	85,00	
43	669,89	7188,21	Jun/73	910,00	Sta. Felicidade	136,00	0,00	59,00	5,00	905,00	7,00		-		51; 125	859, 785	-	9,00	Ok
44	669,95	7188,86	Jun/90	967,00	Cascatinha	74,00	2,60	47,00	17,00	950,00	-	-	0 - 40	927,00	filtros	(941 - 937)	26 - 30	0 - 26	Ok
45	669,99	7184,18	Set/95	910,00	Seminário	57,00	6,00	17,40	3,80	906,20	(0-21)	(21-27)	-		27; 31; 33; 35	883,879,877,8 75	-	(0-23)	Ok
46	670,12	7188,28	Mar/71	900,00	Cascatinha	100,00	7,50	70,00	0,00	900,00	(0 - 10)		-		42;63;95	858, 837, 805	16,5 a 20	24,70	
47	670,17	7175,55	Dez/95	925,00	Pinheirinho	197,00	3,10	119,00	22,10	902,90	-	-	-		-		-	56	Ok
48	670,39	7175,77	Jun/93	920,00	Pinheirinho	150,00	0,50	111,50	45,00	875,00	4,00	-	71		94 a 100	826 a 820	-	77	Ok
49	670,41	7178,89	Nov/70	930,00	Novo Mundo	100,00	3,20	81,00	35,00	895,00	5,00		(5 - 25)	905,00	?		?	?	des.
50	670,75	7184,83	Mai/94	930,00	Batel	114,00	3,50	53,80	14,40	915,60	3,00	-	(3 - 25)		29; 34,5; 114	816	-	28,50	Ok
51	670,91	7187,94	Ago/69	940,00	Sta. Felicidade	50,00	4,00	32,00	6,00	934,00	5,00		-		filtros	(914 - 910)	26 - 30	39,00	
52	670,92	7186,02	?	910,00	Bigorriho	54,00	3,80	14,00	18,00	892,00	-								
53	670,95	7188,08	Jun/93	930,00	Sta. Felicidade	150,00	3,00	49,85	12,00	918,00		-	-		??	(900 - 898)	(30-32)	30,00	
54	671,03	7178,92	Jun/89	925,00	Capão Raso	100,00	5,00	61,50	49,00	876,00	5,00	-	(5 - 55)		85 e 90	(872-870), 840,835	(53 - 55)	(0 - 53)	Ok

TABELA 2c - DADOS DE POÇOS TUBULARES (CONTINUAÇÃO).

nº	UTM - w	UTM - s	data	altitude	bairro	prof.	vazão	N.D.	N.E.	cota N.E.	solo	rocha	Form.	altit. cota	E.A.	cota da E.A.	filtros	revest.	Func.
	km	km		(m)		(m)	(m³/h)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	esp.(m)	Fm.Guab	(m)	(m)	posição	(m)	atual
55	671,10	7184,11	?	910,00	Batel	84,00	2,80	?	?	?									
56	671,15	7174,40	Nov/74	928,00	Pinheirinho	211,00	0,00	-	-	?	-	-	(0 - 62)		-		33,4 - 37	88,45	improd
57	671,21	7186,13	?	925,00	Bigorriho	48,00	9,00	18,24	24,00	901,00	-								
58	671,30	7180,09	Jul/91	930,00	Novo Mundo	102,00	0,00	-	-	?	9,00	-	(9-49)		-		-	-	improd
59	671,50	7186,21	?	930,00	Bigorriho	135,00	4,50	24,63	6,00	924,00	-								
60	671,54	7188,06	Ago/76	950,00	Vista Alegre	111,00	8,80	31,00	18,00	932,00	5,00		-		89; 105	861, 845	22 - 25,5	45,50	
61	671,55	7177,21	Nov/75	930,00	Pinheirinho	300,00	3,38	78,00	37,00	893,00	?	?	(0 - 74)		52; 92;160;	878, 838, 770	54 - 58	78,00	
62	671,60	7176,90	Mai/69	928,00	Pinheirinho	228,00	0,40	72,00	45,00	883,00	-		(0 - 79)		50 a 75		54 - 57	76,45	improd
63	671,67	7177,19	Jun/74	930,00	Pinheirinho	200,00	1,00	100,00	47,00	883,00	3,00	-	(3 - 80)		57; 83	873, 847	-	-	
64	671,67	7186,32	?	943,00	Bigorriho	100,00	2,40	45,00	12,00	931,00	-								
65	671,67	7184,55	Jan/58	935,00	Centro	150,00	3,30	143,00	31,00	904,00	-		(0 - 30)		60;70;80	875, 865, 855	-	43,34	Ok
66	671,74	7176,93	Jul/73	932,00	Pinheirinho	122,00	8,00	65,00	52,00	880,00	5,00		(5 - 81)		-	(872 - 868)	60 - 64		
67	671,80	7185,87	Fev/73	930,00	Bigorriho	130,00	10,00	70,00	4,00	926,00	7,00		-		60; 80; 118	870, 850, 812	-	16,00	
68	671,91	7177,20	Fev/75	925,00	Pinheirinho	278,00	6,30	78,00	47,00	878,00	?	?	?		127; 187;239	798,738,686	-	-	
69	671,93	7184,73	Fev/72	928,00	Batel	152,00	0,00	78,00	15,00	913,00	5,00		(5 - 15)		140;145;150	788, 783 e 778	-	23,00	
70	671,95	7186,14	Set/94	935,00	Bigorriho	120,00	3,04	87,10	44,00	891,00	-	-	15		?		-	29	Ok
71	672,04	7184,26	Nov/91	920,00	Batel	106,00	5,30	66,00	22,35	897,65		(24 - 30)	(0 - 24)			(886 - 882)	(34 - 38)	(0 - 34)	Ok
72	672,05	7177,13	Jan/73	923,00	Pinheirinho	105,00	2,00	87,00	6,00	917,00	5,00		(5 - 25)		100	(886-883) e 823	37 - 40,5	70,00	
73	672,08	7177,04	Dez/72	924,00	Pinheirinho	210,00	0,00	-	-	?	-		(0 - 40)		-		53 - 60	60,00	improd
74	672,13	7183,30	?	925,00	Água Verde	90,00	0,00	-	12,00	913,00	(12-36)				-				improd
75	672,15	7186,66	Set/91	925,00	Bigorriho	76,00	1,30	60,54	14,73	910,27	-		(0 - 24)	901,00	52; 76	873 e 849	-	24,00	Ok
76	672,23	7177,07	Ago/75	923,00	Pinheirinho	105,00	0,00	-	-	?	9,00		(9 - 78)		-		10 a 13,6	65,40	improd
77	672,25	7187,06	?	935,00	Bigorriho	39,00	4,20	12,00	9,00	926,00	-								
78	672,36	7184,54	Abr/95	930,00	?	150,00	1,60	120,00	66,00	864,00	3,00	-	(3 - 42)		127	803	-	42,00	Ok
79	672,36	7184,11	Ago/74	920,00	Rebouças	301,00	0,00	-	-	?	10,00		(10 - 21)	899,00	-		-	50,50	improd
80	672,40	7184,64	Ago/95	930,00	Batel	248,00	5,00	104,37	90,50	839,50			30		226	704		61	Ok
81	672,51	7186,19	?	915,00	Mercês	34,00	4,00	8,10	1,00	914,00	(1 - 9)								
82	672,59	7184,88	Fev/92	930,00	Batel	107,00	3,60	65,38	42,00	888,00			-		?		-	38	Ok
83	672,68	7188,29	?	920,00	Pilarzinho	24,00	10,28	2,40	12,00	908,00	-								Ok

TABELA 2d - DADOS DE POÇOS TUBULARES (CONTINUAÇÃO).

nº	UTM - w	UTM - s	data	altitude	bairro	prof.	vazão	N.D.	N.E.	cota N.E.	solo	rocha	Form.	altit. cota	E.A.	cota da E.A.	filtros	revest.	Func.
											esp.	alter.	Guab.	Fm.Guab			posição		atual
	km	km		(m)		(m)	(m3/h)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	esp.(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	
84	672,77	7185,01	?	930,00	Batel	230,00	0,70	155,50	?	?	-	-	-		-		-	-	Ok
85	672,97	7188,03	Jan/78	910,00	Pilarzinho	67,00	44,00	?	2,00	908,00	24,00		-		50; 65	860, 845	-	36,35	Ok
86	673,04	7185,00	?	928,00	Batel	100,00	1,40	40,80	?	?	?								
87	673,05	7191,25	Ago/75	975,00	Pilarzinho	105,00	12,00	38,00	1,00	974,00	5,00		-		70 - 81;	905, 894	19,45-23	62,50	Ok
88	673,10	7184,79	Dez/93	927,00	Batel	128,00	13,20	61,80	60,70	866,30	-	-	0 - 35				-	52	Ok
89	673,10	7188,45	Fev/95	910,00	Bom Retiro	54,00	2,25	36,00	6,30	903,70	3,00	-	(3-18)		45	865	-	23,50	Ok
90	673,12	7182,30	Ago/79	914,00	Água Verde	171,00	12,00	68,00	24,00	890,00	6,00		(6 - 30)		88; 151	826, 763	33 - 36	44,50	Ok
91	673,28	7184,24	Dez/94	905,00	Batel	66,00	3,50	40,00	11,00	894,00	2,00	-	(2 - 20)	885,00	41; 54	864 e 851	-	24,00	Ok
92	673,29	7185,17	Nov/95	920,00	Batel	230,00	7,24	114,30	61,40	858,60	2	34 - 47	(2 - 34)		225	695	-	49	Ok
93	673,32	7185,08	Set/93	920,00	Batel	100,00	6,65	52,00	48,00	872,00	4	26 - 42	(4 - 26)		80 e 95	(892-890), 835, 825	(28 - 30)	(0 - 28)	Ok
94	673,39	7184,38	?	905,00	Batel	150,00	0,00	-	3,00	902,00	(3 - 20)			885,00	-				improd
95	673,40	7184,73	Nov/80	920,00	Centro	156,00	9,23	79,00	27,00	893,00	6,00		(6 - 48)		145	775	-	60,50	?
96	673,44	7185,83	?	900,00	Centro	89,00	3,00	14,80	6,00	894,00	(6 - 30)								
97	673,52	7186,27	Abr/71	900,00	Centro	202,00	5,00	63,00	2,00	898,00	-		-		89; 192	811, 708	-	5,00	Ok
98	673,57	7186,14	Out/73	896,00	Centro	295,00	2,70	148,00	11,00	885,00			(0-8)		115; 235 e 287	781, 661, 609	-	(0-30)	Ok
99	673,69	7186,24	Set/70	900,00	Centro	100,00	12,00	31,00	5,00	895,00	-		(0 - 15)		81	819	13 - 14	17,00	
100	673,73	7185,80	Abr/70	900,00	Centro	66,00	0,00	25,00	1,50	898,50	6,00		(6 - 10)		61	839	13 - 14	14,00	-
101	673,74	7183,97	?	906,00	Rebouças	250,00	0,80	21,25	?	?	?								
102	673,77	7191,52	Jul/73	950,00	Abranches	82,00	3,00	54,00	5,00	945,00	5,00		-		75; 80	875, 870	-	17,70	
103	673,98	7189,18	Nov/80	905,00	S.Lourenço	150,00	4,00	62,00	2,00	903,00	5,00		-	889,00	30;60;95	875, 845 e 810	-	17,50	
104	674,15	7188,02	Ago/95	904,00	Centro Cívico	150,00	15,00	18,00	3,00	901,00	6,00	-	(6 - 20)		20	884	(20-22)	(0-20)	Ok
105	674,19	7183,35	?	917,00	Parolin	75,00	1,60	58,00	12,00	905,00	(12-49)								
106	674,46	7184,63	Nov/78	895,00	Rebouças	110,00	4,00	55,00	5,00	890,00	6,00		(6 - 18)		92; 100	803, 795	-	65,50	
107	674,63	7186,63	Set/77	894,00	Centro	127,00	18,00	20,00	13,00	881,00	6,00		-	875,00	21; 108	873, 786	16 a 23	16,50	Ok
108	674,66	7186,24	?	892,00	Centro	52,00	3,00	1,29	3,00	889,00	-								
109	674,78	7195,32	Ago/71	1005,00	Cachoeira	55,00	2,00	44,00	5,00	1000,00	1,00		-		filtros	(979 - 975)	26 a 30	43,00	
110	674,88	7188,48	Jun/95	920,00	Ahú	60,00	2,20	29,70	7,50	912,50	3,00	-	(3 - 27)		33; 36	887, 884	-	30,00	Ok
111	674,91	7188,60	?	920,00	Ahú	81,00	3,70	5,27	6,00	914,00	-								

TABELA 2e - DADOS DE POÇOS TUBULARES (CONTINUAÇÃO).

nº	UTM - w	UTM - s	data	altitude	bairro	prof.	vazão	N.D.	N.E.	cota N.E.	solo	rocha	Form.	altit. cota	E.A.	cota da E.A.	filtros	revest.	Func.
	km	km		(m)		(m)	(m³/h)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	esp. Guab.	Fm. Guab	(m)	(m)	posição	(m)	atual
112	675,05	7185,94	?	890,00	Centro	50,00	3,00	2,80	7,00	883,00	-								
113	675,09	7180,18	Set/95	910,00	Boqueirão	75,00	1,00	42,00	27,00	883,00	9,00	-	(9 - 51)	859,00		(885 - 881)	(25 - 29);	(0 - 25)	Ok
114	675,18	7189,33	?	935,00	Ahú de baixo	78,00	1,00	36,00	3,00	932,00	(7 - 30)								
115	675,21	7189,24	?	930,00	Ahú	152,00	0,00	?	6,00	924,00	-								improd
116	675,22	7181,34	Abr/95	885,00		48,00	6,00	17,00	6,00	879,00	3,00		(3-15)		44	841	-	19,50	Ok
117	675,27	7180,35	Mai/81	900,00	Vila Hauer	170,00	3,20	45,00	24,00	876,00	?		?		35;40;61;63	865,860,839,837	35 - 40		
118	675,31	7185,85	Nov/91	893,00	Centro	75,00	1,20	31,05	2,00	891,00	10,00	-	(10 - 12)		22; 44	871, 849	-	12,00	Ok
119	675,48	7188,80	?	920,00	Cabral	?	?	?	?	?									
120	675,53	7188,39	?	926,00	Juvevê	103,00	9,00	34,00	23,00	903,00	-	-	27		64 - 66	862, 860	-	35	Ok
121	675,57	7182,78	Mai/76	885,00	Prado Velho	180,00	7,96	52,00	18,40	866,60	?		?		123; 170	762, 715	-	-	Ok
122	675,59	7172,53	Jan/91	885,00	Sítio Cercado	100,00	11,60	41,00	4,50	880,50	15	-	?	856,60	45 - 60	840, 825	-	28,4	Ok
123	675,61	7182,65	Mar/76	885,00	Prado Velho	140,00	2,64	45,40	33,10	851,90	?		?		127	758	30 - 33	57 - 63	Ok
124	675,62	7185,87	?	890,00	Cristo Rei	51,00	4,00	4,00	9,00	881,00	-								
125	675,65	7185,75	?	890,00	Cristo Rei	100,00	3,60	5,60	7,00	883,00	(7 - 15)								
126	675,65	7182,82	Dez/79	883,00	Prado Velho	118,00	21,18	79,80	16,00	867,00	6,00		(6 - 12)		106 e 115	777, 768	-	19,40	Ok
127	675,65	7188,96	Jan/96	913,00	?	142,00	?	?	?	?					44; 46 e 112	869, 867 e 801	-	13,50	Ok
128	675,69	7182,76	Dez/79	883,00	Prado Velho	142,00	21,04	63,50	14,00	869,00	?		?		-		-	?	Ok
129	675,71	7185,75	Dez/91	890,00	Cristo Rei	100,00	9,00	55,80	5,60	884,40	5	-	(5 - 18)		48 e 86	842, 804	-	28,7	Ok
130	675,76	7182,74	Fev/94	883,00	Prado Velho	100,00	27,31	57,80	29,00	854,00	-	-	15		?		-	24,5	Ok
131	675,82	7183,51	Mai/79	882,00	Prado Velho	79,00	32,00	28,00	2,00	880,00	6,00		-	853,00	35; 69	847, 813	-	31,70	Ok
132	675,84	7183,43	Jul/71	882,00	Prado Velho	142,00	4,50	90,00	1,00	881,00	5,00		-	865,00	70; 130	812, 752	16,14-20	17,49	Ok
133	675,85	7180,72	Ago/92	883,00	Hauer	127,00	8,00	18,00	10,50	872,50	-	-	?	840,00	124	759	-	45	Ok
134	675,88	7185,58	Jan/60	893,00	Jd. Botânico	117,00	8,00	85,00	4,00	889,00	-		13,00	880,00	10; 20; 40; 85; 110	853, 808 e 783	(38 - 42)	2,9 - 17	Ok
135	675,95	7187,23	Abr/79	895,00	Alto da XV	103,00	4,00	??	4,00	891,00	1,00	(1 - 18)	-		66; 94	829, 801	-	15,00	
136	675,96	7186,61	Jun/81	895,00	Alto da XV	120,00	0,00	-	-	?	6,00	(6 - 18)	-		-		-	-	improd
137	676,00	7180,44	Ago/95	884,00	Hauer	176,50	4,35	106,00	41,60	842,40	25	25 - 55	?	829,00	95 - 100	789, 784	-	58,5	Ok
138	676,06	7186,19	Ago/94	895,00	Cristo Rei	50,00	3,13	11,50	8,80	886,20			(0 - 14)	881,00	33 e 37	862 e 858		(0 - 16)	
139	676,30	7177,33	Dez/95	915,00	Boqueirão	200,00	0,00	-	-	?	-	-	-		-		-	-	improd
140	676,35	7183,72	Ago/74	895,00	Prado Velho	161,00	3,42	76,00	5,00	890,00	4,00		(4 - 19)		125; 131	770, 764	34 - 37,5	36,50	Ok

TABELA 2f - DADOS DE POÇOS TUBULARES (CONTINUAÇÃO).

nº	UTM - w	UTM - s	data	altitude	bairro	prof.	vazão	N.D.	N.E.	cota N.E.	solo	rocha	Form.	altit. cota	E.A.	cota da E.A.	filtros	revest.	Func.
	km	km		(m)		(m)	(m³/h)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	esp. Guab.	Fm.Guab	(m)	(m)	(m)	(m)	atual
141	676,73	7176,05	Mar/92	910,00	Boqueirão	125,00	0,20	-	-	?	-	-	-		-		-	-	improd
142	677,02	7178,88	Jun/91	882,00	Boqueirão	60,00	1,00	18,00	7,50	874,50	8,00		(8-26)		57	825	-	?	Ok
143	677,06	7180,48	?	877,00	Vila Hauer	30,00	3,50	6,00	3,00	874,00	-	-	(0 - 30)		-	861, 855	(15,5 - 21,5)	(0 - 15,5)	Ok
144	677,19	7186,50	Abr/95	915,00	Alto da XV	131,00	1,00	70,00	18,00	897,00	-	21 - 81	21		81	834, (873-869)	42 - 46	0 - 42	Ok
145	677,24	7182,11	Set/71	915,00	Guabirrotuba	212,00	9,90	70,00	21,00	894,00	-	-	(0 - 35)		190; 195	725, 720	30 - 37	43,00	
146	677,53	7182,73	Mai/69	921,00	Jd. Américas	118,00	0,00	61,00	15,00	906,00	6,00		(6 - 65)		filtros	(901 a 898)	20 a 23	60,00	
147	677,69	7183,89	Jul/80	910,00	Jd. Américas	250,00	0,00	-	-	?	3,00	-	(3 - 40)		192		-	56,50	improd
148	678,40	7192,87	Jan/94	930,00	Sta. Candida	76,00	8,80	9,45	3,47	926,53	10	(10 - 25)	?	905,00	-		-	27	Ok
149	678,41	7184,10	?	915,00	Cajuru	98,00	7,20	46,85	35,00	880,00	-	-	-		-		-	55	Ok
150	678,43	7176,23	Mar/79	871,00	Boqueirão	97,00	20,30	51,00	4,00	867,00	1,00		(1 - 6)	841,00	84; 95	787, 776	-	31,50	Ok
151	678,50	7181,13	Jul/69	885,00	Uberaba	130,00	0,00	-	-	?	-	?	(0 - 60)		-		-		improd
152	678,66	7187,71	Abr/75	900,00	Bacacheri	205,00	0,00	-	-	?	12,00	-	(12 - 48)		-		-	73,50	improd
153	678,67	7187,78	Mai/75	900,00	Bacacheri	205,00	0,00	-	-	?	-	-	(0 - 70)		-		-	-	improd
154	678,71	7187,73	Mai/75	900,00	Bacacheri	100,00	0,00	-	-	?	4,00	-	(10 - 69)		-		48 - 51,5	74,40	improd
155	678,79	7187,25	?	890,00	Tarumã	132,00	11,30	49,95	1,00	889,00	3	-	(3 - 18)		?		-	19	Ok
156	678,94	7180,33	Jun/90	890,00	Uberaba	144,00	1,00	76,35	17,00	873,00	-	-	70		85 - 90	(828-824), 805, 800	62 - 66	72	Ok
157	679,02	7191,94	Abr/95	935,00	Tingui	87,00	1,30	71,00	10,00	925,00	9,00		(9 - 21)		33; 72	902, 863	-	22,40	Ok
158	679,03	7174,54	?	885,00	S. J. Pinhais	213,00	7,92	24,5	12,2	872,80	-	-	-		-		-	-	Ok
159	679,07	7186,52	Jun/82	891,00	Tarumã	180,00	3,00	54,00	4,00	887,00	6,00		(6 - 24)		146; filtros	(851) e 745	36,5 - 39	40,00	
160	679,09	7187,18	Nov/69	891,00	Tarumã	56,00	6,00	50,00	1,00	890,00	10,00		(10 - 25)		filtros	(876 - 869)	15 a 22	15,50	
161	679,15	7182,85	Jun/73	910,00	Cajuru	90,00	5,50	55,00	20,00	890,00	-	?	(0 - 70)		filtros	(883 - 880)	27 - 30	60,50	
162	679,29	7186,83	Nov/69	891,00	Tarumã	40,00	8,00	25,00	1,00	890,00	0,20		(0,2 - 26)		30; 34	861 e 857	19 - 25	22,60	
163	679,41	7179,41	Nov/95	905,00	Uberaba	203,00	0,60	51,00	11,80	893,20	3,00	-	66		52, 164	(854-864), 741	51 - 61	0 - 51	Ok
164	679,42	7188,84	Nov/69	895,00	Bacacheri	88,00	3,80	53,00	1,00	894,00	-		(0 - 10)		45; 52	850, 843	13 - 16,4	16,00	
165	679,68	7191,00	Fev/91	950,00	Bacacheri	72,00	0,00	-	-	?	15,00	(15-24)	-	926,00	-		-	-	improd
166	680,11	7190,20	Abr/89	930,00	Bairro Alto	122,00	5,00	65,00	?	?	-	-	-		?		-	15,7	Ok
167	681,00	7191,47	Nov/94	900,00	Atuba	100,00	1,00	53,18	1,22	898,78	13,00	-	-		30; 63	870 e 837	-	15,30	Ok
168	683,67	7189,35	?	884,00	Pinhais	53,00	1,40	28,00	2,00	882,00	2,00		30	854	27	857			

TABELA 2g - DADOS DE POÇOS TUBULARES (CONTINUAÇÃO).

nº	UTM - w	UTM - s	data	altitude	bairro	prof.	vazão	N.D.	N.E.	cota N.E.	solo	rocha	Form.	altit. cota	E.A.	cota da E.A.	filtros	revest.	Func.
	km	km		(m)		(m)	(m³/h)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	esp.(m)	(m)	(m)	(m)	posição	(m)	atual
169	683,73	7183,45	Jun/93	?	Pinhais	71,00	9,00	6,00	1,00	?	2,00	(2 - 11)	(11 - 26)				(20 - 26)	(0 - 20)	Ok
170	684,74	7185,55	Jul/95	876,00	Pinhais	60,00	11,70	21,45	3,10	872,90	3,00		(3 - 41)		41, 43, 45	835, 833, 831	(15 - 17)	(0 - 15)	Ok
171	685,00	7189,75	?	900,00	Piraq./Pinhais	50,00	7,20	19,00	16,50	883,50	3,00		(3-42)	858,00			(35-44)	(0-35);	Ok
172	686,38	7191,34	?	942,00	Colombo	120,00	5,00	79,00	32,00	910,00	-	?	(0 - 65)		50; 73; 105		50,4 - 54	66,00	Ok
173	686,94	7191,82	?	950,00	Colombo	100,00	6,44	55,00	30,00	920,00	-	-	(0 - 70)		37; 52		35 - 38,6	78,00	Ok
174	687,81	7190,47	?	942,00	Piraquara	51,80	3,60	27,49	25,00	917,00	6,00		72	870	(30 - 50)	902			
175	687,92	7190,15	?	910,00	Piraquara	44,60	0,00			?	6,00		44	866	(15-19); (23-31)	882			
176	688,45	7192,85	?	905,00	Quatro Barras	43,00	0,00	-	-	?			43	862	-				
177	688,45	7193,35	?	902,00	Quatro Barras	36,00	1,80	15,55	6,60	895,40			36	866	(16,0-20,0); (20-24)	878			
178	688,80	7183,23	?	880,00	Piraquara	56,00	7,54	16,82	1,90	878,10	12,00		-		22, 34	846			
179	688,93	7190,78	?	900,00	Pinhais	54,30	31,68	23,81	15,59	884,41			54,3	845,7					
180	688,95	7183,82	?	880,00	Piraquara	45,00	0,90	41,00	1,00	879,00	3,00		-		(39 - 41)	840			
181	689,46	7190,24	?	895,00	Pinhais	55,30	66,00	20,66	8,84	886,16			55,3	839,7	(27-41); (49-51)	861 e 845			
182	689,57	7190,18	?	896,00	Pinhais	54,50	65,00	22,50	9,99	886,01			55	841	(27-41); (49-53)	845			
183	689,70	7190,87	?	902,00	Pinhais	50,40	60,00	26,47	18,10	883,90			50,4	851,6	(21-25); (33-50)	879 e 862			
184	689,75	7189,90	?	900,00	Piraquara	41,00	20,00	20,58	6,39	893,61	3,00		52	848	21, 37	863			
185	690,95	7183,62	?	895,00	Piraquara	32,00	4,20	15,00	4,00	891,00	3,00		-		29, 31	865			
186	691,40	7187,52	?	894,00	Piraquara	56,00	7,20	21,90	9,00	885,00	3,00		20	874	(19 - 32)	869			
187	691,57	7184,13	?	895,00	Piraquara	30,00	9,00	8,00	1,00	894,00	2,00		-		7, (13 - 15)	880			
188	693,26	7194,52	?	900,00	Camp. G. Sul	90,00	100,00	24,50	17,89	882,11	15,00		52	848	62	838			
189	693,40	7192,95	?	895,00	Quatro Barras	150,00	6,05	28,00	17,00	878,00	2,00		39	856	105, 124	790			
190	693,82	7194,85	?	905,00	Camp. G. Sul	51,00	1,76	32,80	30,20	874,80	6,00		51	854	(39,8-49,8)	860			

TABELA 3a - DADOS FÍSICO-QUÍMICOS DE POÇOS TUBULARES.

n.º	LONG. (UTM)	LAT. (UTM)	Na ⁺ ppm	K ⁺ ppm	Ca ⁺⁺ ppm	Mg ⁺⁺ ppm	HCO ₃ ⁻ ppm	SiO ₂ ppm	TDS ppm	Cl ⁻ ppm	NO ₃ ⁻ ppm	SO ₄ ⁼ ppm
1	672,15	7186,66	30,2	1,4	20	6,2	146,4	21,4	206,4	5,6	0	2,4
2	667,47	7193,54	7,4	1,2	4,7	1,9	27,4	-	80	9,2	1,7	0,4
3	676,00	7180,44	58,8	3,1	10,6	1	159,8	31,4	168,5			
4	678,40	7192,87	10,4	3,6	17,5	4,1	91,5	39,6	121,6	5	2,3	2,3
5	669,95	7188,86	2,4	2,8	4	2,8	30,5	24	73,6	2,8	0	0,4
6	665,71	7186,30	5,2	1	25,5	9,8	134,2	29,2	155,6	2,4	0	0,6
7	675,85	7180,72	11,8	5,6	28	6,2	152,5	46,8	178,4	1,1	0	1,5
8	675,71	7185,75	9,8	2,3	32	11,2	146,4	35,5	212,8	17,8	5,2	0,9
9	673,21	7186,01	14,3	0,7	38,5	8,3	152,5	42	228,4	8,9	19,6	3,7
10	674,66	7186,24	16,7	2,3	30,4	6,8	152	36,6	192,4	8,5	0	1,4
11	674,67	7186,23	21,8	3	34,3	8,2	176,9	40,2	219,6	14,2	0	5,4
12	673,10	7184,79	19,1	2	25,6	7,8	152,5	28,8	175,2	1,1	0	3,5
13	675,62	7185,87	17,5	2,5	40	12,6	122	44,3	360	63,9	3,4	0,2
14	671,03	7178,92	48,6	2,3	16	5	189,1	21,7	226	2,1	0	6,1
15	673,04	7185,00	10,9	2,1	28	6,8	140,3	32,8	173,2	2,1	0	3,6
16	673,14	7184,90	22,5	3,5	26,3	5,7	152,5	30,9	179,2	0,7	0	6,2
17	672,04	7184,26	19	1	31,2	11,2	189,1	38,2	206	6	0	0,5
18	672,40	7184,64	20,6	1	26,2	7,9	152,5	30,3	164,4	152,5	0	16,2
19	672,59	7184,88	10,4	2,6	36,8	10,6	152,5	37,2	256	17,7	0	1,1
20	673,44	7185,83	33,2	0,8	48,7	10,1	244	32,7	312	21,3	0	6
21	671,95	7186,14	8,4	0,8	36,8	15,4	159,1	28,8	208,4	16,8	20	4,2
22	675,53	7188,39	19,8	1	36,9	10,2	207,4	24,5	209,6	2,8	0	4,3
23	671,10	7184,11	26,9	1,1	10,7	29,6	207,4	35,4	221,6	1,8	0	5,1
24	674,19	7183,35	58,6	1,1	8,7	1,4	152,5	15,7	209,2	6,7	0	6,5
25	673,68	7185,05	34,2	3,1	31,1	8,7	219,6	31	213,6	3,6	0	1,6
26	672,25	7187,06	11,6	6,3	28	10,6	170,8	29,1	175,2	3,9	0	1,3
27	667,43	7174,57	27,2	3	82,3	14,1	134,2	44,3	?	-	0	25,6
28			5,26	1,93	11,09	3,96	63	15	191	1	0,22	2
29	667,83	7189,25	3,8	1,2	25,1	19,04	121,95	15	407	34	6	3
30	667,91	7188,26	30,7	2,4	20,7	4,3	122	41,8	103,6	21,3	0	2,1
31	675,61	7182,65	13,4	4,4	24,8	9,7	103,7	49,4	209,6	42,6	2,6	4
32	675,69	7182,76	21,3	4,7	40,9	17,5	195,2	49,3	?	9,2	7	4
33	675,65	7182,82	15,6	3,4	25,7	9,2	152,5	47,6	202	8,5	0,9	2,4
34	675,57	7182,78	12,2	3,6	26,5	12,2	134,2	50,1	159,2	18,5	14	0
35	675,76	7182,74	16,4	3,6	24	10,2	146,4	34,7	?	9,2	7	4
36	666,02	7179,01	12	2	21,6	7,3	134,2	32,4	176	2,1	0	0,9
37	677,19	7186,50	32,6	7	19,1	3,6	164,7	34,5	184,8	1,7	0	4,8
38	675,31	7185,85	11,7	2,3	31,1	10,1	146,4	9,9	196	9,9	2,8	1,1
39	673,57	7186,14	37,1	1	55,1	8,7	183	21,7	351,2	67,5	6,3	4,9
40	672,68	7188,29	10,5	3	20,7	7,2	67,1	39,9	239,2	28,4	15	0,8
41	670,95	7188,08	8,6	3,2	17,5	3,8	62,5	41	180,4	10,6	15,5	3,3
42	681,00	7191,47	8,5	1,7	8,78	3,66	69,51	35,92	124	1,2	0,22	1
43	673,10	7188,45	10	2,3	47,25	7,5	141,46	-	306	19,6	24,26	0,1
44			7,1	0,9	24	12,6	152,5	21	151,2	2	0,6	0
45	677,02	7178,88	41,9	4,3	26,3	6,2	85,4	33	245,6	24,8	0	2,7
46	677,06	7180,48	17	2,9	19,51	4,66	132,93	31,8	132	2	0	0

TABELA 3b - DADOS FÍSICO-QUÍMICOS DE POÇOS TUBULARES (CONTINUAÇÃO).

n.º	LONG.	LAT.	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	TDS	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁼
	(UTM)	(UTM)	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
47	665,85	7186,33	8,1	2,5	16	4,9	97,6	42,5	143,2	0,7	0	0
48	664,93	7191,37	5,59	2,3	9,57	4,94	56,1	25	191	2	3,14	2
49	665,88	7186,32	6,1	2,4	10,3	3,8	61	69,2	112,4	2,4	0	4,1
50			4,8	1	9,5	4,3	61	14,4	88	1,7	0	0,6
51	668,37	7189,06	10,7	2,6	31,1	5,3	140,3	41,4	183,2	3,5	0	1
52	?	?	7,18	1,49	32,55	6,25	136,59	56	198	1	0,35	1
53	670,75	7184,83	7,5	0,7	43	12	184,15	7,8	298	8	11,91	1
54	670,39	7175,77	43,6	1,8	22	3,5	186,5	41,9	221	1,9	0	0
55	667,53	7189,74	1,4	0,5	27,23	26,14	175,61	8	241	6	7,79	3
56	664,63	7185,32	-	-	24	8	119,51	17,97	160	4,6	0,57	1
57	664,77	7185,28	4	0,9	23,02	11,18	125,61	12,82	104	2,6	0,22	0,1
58	673,29	7185,17	24,6	2,6	26,4	11,7	183	35,3	208,4	1,4	3,4	1,1
59	673,32	7185,08	25,3	3,5	27,2	6,8	158,6	34,5	190	5,3	3,4	4,9
60	673,34	7185,07	41,7	1,4	26,2	5,5	130	33,5	223,6	11,3	0	55,7
61	678,79	7187,25	21,4	2	24,3	7,6	163,6	88	?	1,1	0	0
62			9,5	3,1	9,5	3,3	73,2	51,5	132	1,4	0	0,2
63	685,00	7189,75	22,2	2,4	25,5	8,2	176,9	47,4	226,8	1,4	0	1,7
64			5,9	2	5,5	1,9	39,7	44,5	95,2	2,8	0	0,4
65	683,73	7183,45	13,3	2,2	12,7	5,8	100,7	39,4	151,6	3,1	0	0,4
66			2,1	0,9	16,1	7,5	90,24	16	116	1	0,04	0
67	688,45	7192,85	7,6	1,2	41,7	13,6	207,4	26,2	278,2	5,7	0	0
68	663,72	7172,40	8,3	2,4	7,2	2,9	61	73,9	255,6	2,1	0	0
69	689,75	7189,90	11	2	4,7	1,4	42	59,34	67,2	1,3	0	0
70	679,03	7174,54	9,2	3,3	35,3	8,3	164,7	19	190,4	9,2	6,1	7,1
71	665,24	7173,34	26,8	2,8	36,1	9,7	231,8	31,8		0,7	0	0,8
72	?	?	42,2	2,2	16	3,8	122	45,6	223,2	35,5	0	0,3
73	684,80	7178,60	20,1	1,2	28,9	2,9	134,2	39,1	234,8	5	0	7,1
74			25,1	1,4	24,7	6,8	170,8	31,3	198,4	1,4	0	4
75			35,1	1,3	15,1	4,3	109,8	43,7	207,6	28,4	0	0,6
76	686,94	7191,82	21,7	2	32,7	15	231,8	32,3	224	2,1	0	0,2
77	686,38	7191,34	24,1	1,4	25,5	14,5	213,5	39,4	212,8	0,7	1,1	0,5

O tratamento destes dados foi realizado de maneira conjunta, apesar dos mesmos provirem de aquíferos diferentes, pois as populações de cada conjunto apresentam comportamento estatístico similar.

A distribuição de frequência das populações foi comparada através de testes estatísticos como χ^2 (qui-quadrado); distribuição t - student; e as séries ANOVA. Para o teste "t", a comparação da variável vazão, foi realizada a partir dos valores logaritmados, em virtude das populações apresentarem distribuição do tipo log-normal, fornecendo os seguintes valores (tabela 04):

TABELA 04 - RESULTADOS DE TESTES ESTATÍSTICOS DE VAZÃO ENTRE POPULAÇÕES DOS AQUÍFEROS FRATURADOS DO EMBASAMENTO CRISTALINO E ARCÓSIOS DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA.

AQUÍFEROS	médias	variância	t	p
Embasamento Cristalino (fraturas)	0,454	0,18		
Arcósios Formação Guabirotuba	0,421	0,29	0,25	0,8

Foram realizados testes para outras variáveis relacionadas aos diferentes aquíferos, resultando também em populações cujo comportamento é suficientemente similar para permitir o tratamento em conjunto dos dados.

Uma vez avaliados, os dados dos poços tubulares foram georeferenciados em coordenadas UTM. Os mapas da área que serviram de base para localização dos poços, bem como dados altimétricos do terreno foram obtidos a partir de cartas topográficas 1:20.000 (COMEC, 1976).

As informações geológicas de campo foram igualmente georeferenciadas. A base geológica utilizada proveio do “Projeto Integração Geológica da Região Metropolitana de Curitiba” (CPRM, 1988).

A avaliação do comportamento hidrogeoquímico dos aquíferos foi realizada a partir do tratamento de resultados de análises físico-químicas das águas dos poços tubulares.

A investigação de anomalias gravimétricas Bouguer partiu do tratamento de dados coletados junto ao Departamento de Geociências, da UFPR.

5.2 TRABALHOS REALIZADOS

O trabalho iniciou-se com a formulação de um plano de pesquisa. Neste, foram detalhados o alcance da pesquisa e a forma de coleta dos dados.

A coleta de informações foi realizada junto a construtoras, órgãos públicos e proprietários particulares de poços tubulares. Os perfis construtivos dos poços tubulares obtidos foram examinados e tabulados.

Na medida do possível, os dados, conforme atingiam quantidades estatísticas mínimas, foram sendo utilizados, como base de testes, para exercícios em sala de aula. Alguns experimentos resultaram consistentes, suficientes para

apresentação pública em congressos (Nogueira F.º e Bittencourt, 1995; Nogueira F.º e Soares, 1996).

Inicialmente, dispunha-se de um banco de dados com 122 poços tubulares. Com estes, procedeu-se à primeira distribuição estimada por geoestatística. Observou-se que a distribuição das amostras era muito irregular, dificultando estimativas seguras de confiabilidade. Procedeu-se, então, à nova coleta de registros, as quais foram previamente checadas e selecionadas.

Além dos dados de poços tubulares, também se procedeu a construção de uma base digital com medidas plani-altimétricas a partir de cartas 1:20.000.

Na sequência, foram digitalizadas uma série de outras cartas, como mapa geológico, mapa de drenagens, mapa de arruamentos, contorno dos limites dos bairros e das cidades vizinhas onde a pesquisa se desenvolveu.

Com a construção de um banco de dados consistente, procedeu-se a realização de novas interpolações geoestatísticas.

Para ordenar e extrair informações dos dados coletados, foram empregados diversos métodos relacionados à geoestatística, geofísica e geoquímica, além do reconhecimento de lineamentos estruturais sobre dados geológicos e geomorfológicos. Estes recursos permitiram organizar os produtos gerados, segundo a tecnologia de geoprocessamento, a qual propiciou a superposição de *layers* temáticos centrados em uma mesma área, com informações diferenciadas. Assim, foi possível a comparação dos resultados obtidos com a aplicação das diversas técnicas, sobre as seguintes variáveis:

- a) vazões;
- b) altitude potenciométrica;
- c) entradas de água (limite de intersecção do aquífero pela perfuração);
- d) zona de contato entre os sedimentos da Bacia de Curitiba e as rochas do Embasamento Cristalino.

As similaridades e diferenças, ressaltadas pelos recobrimentos sucessivos das superfícies, reafirmaram características da entidade geológica estudada.

Para variáveis, cujas interpolações, produzidas pelo método geoestatístico, resultaram em reduzida cobertura em relação ao total estudado, as estimações foram realizadas pelo método da análise de superfícies de tendência.

Além das variáveis citadas, coletadas diretamente dos poços tubulares, outras também foram avaliadas, como:

- a) dados hidroquímicos de ensaios laboratoriais em águas de poços tubulares (tabela 3a);
- b) dados gravimétricos.

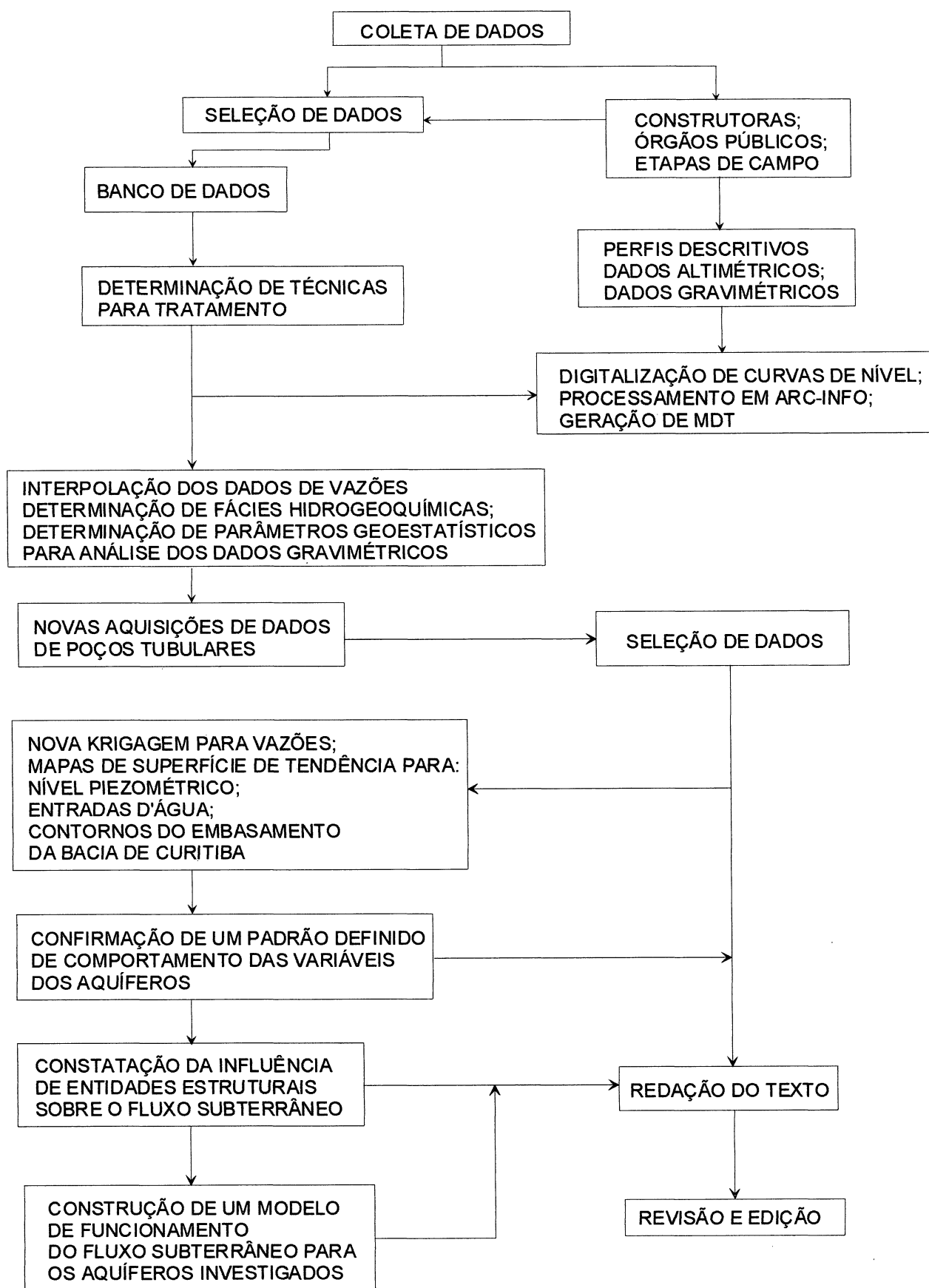
Os estudos geoquímicos consideraram somente os “íons maiores”, uma vez que não havia disponibilidade de dados para elementos menos abundantes. A distribuição dos íons revelou indícios sobre o comportamento do fluxo subterrâneo e das interações hidroquímicas que se desenvolvem nos aquíferos, bem como parâmetros de potabilidade das águas.

Dados gravimétricos foram selecionados a partir de análise estrutural efetuada em variogramas. A partir destes, a abrangência da amostragem foi reduzida sistematicamente, em função da representatividade dos índices de correionalizações obtidos. Ao final, obteve-se uma superfície em que os efeitos de tendências impostas pelo mergulho da superfície do embasamento sob a Bacia de Curitiba, foram minimizados. A interpretação qualitativa do mapa de contornos das anomalias Bouguer revelou zonas preferenciais de descontinuidades estruturais.

As diversas feições estruturais reconhecidas em mapas de contorno e no modelo digital de terreno, foram comparadas com traços digitalizados a partir de fotografias aéreas.

O exercício de simulação do comportamento das variáveis analisadas revelou contornos similares e de formato que gradativamente indicou a influência de estruturas tectônicas no controle do fluxo subterrâneo. Esta dedução permitiu a construção de um modelo genérico de funcionamento dos aquíferos da área investigada.

5.3 FLUXOGRAMA DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO



6 - TRATAMENTO DOS DADOS

Os métodos de análise, aplicados aos dados coletados, foram selecionados na expectativa de que os produtos resultantes permitissem deduções sobre a disposição espacial e comportamento dos aquíferos da área de trabalho.

A escolha dos métodos considerou o desenvolvimento de recursos associados ao geoprocessamento, tecnologia que, através de sistemas computadorizados, privilegia a referência espacial das entidades e favorece análises estruturais. Estas técnicas auxiliaram a investigação planejada, apesar de terem-se realizado sobre entidades geológicas, cujos atributos, por serem espacialmente descontínuos, apresentam dificuldades para serem definidos no espaço por funções matemáticas.

Uma outra vantagem do geoprocessamento refere-se às facilidades na manipulação de informações georeferenciadas, em grande número transcritas através de imagens, mapas, gráficos, seções geológicas, tabelas, etc., representativas de parâmetros e variáveis que interagem no funcionamento dos sistemas aquíferos. Muitas das variáveis investigadas, como a distribuição das vazões, superfície potenciométrica e anomalias Bouguer, ao serem dissociadas, revelaram propriedades específicas do sistema, como a repetição do efeito buraco em variogramas, indicativos da interferência entre entidades geológicas. Posteriormente, a integração destas variáveis possibilitou a construção de um modelo de funcionamento genérico dos sistemas investigados.

6.1 GEOPROCESSAMENTO

Geoprocessamento, a princípio, era considerado como: “uma tecnologia computadorizada que manuseia dados com referência espacial definida” (Marble e Peuquet, 1983). Entende-se que estes dados apresentam endereço espacial fixo, em relação à superfície terrestre e possuem forma, tamanho e dimensão. O crescimento acelerado, interdisciplinar, nas últimas duas décadas, do uso de geoprocessamento, fez evoluir este conceito para “*um conjunto de tecnologias de coleta, tratamento, manipulação e apresentação de informações*

espaciais” (Rodrigues, 1993). A partir desta definição, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG, ou GIS - Geographic Information System) representam apenas, um tipo de sistema em geoprocessamento. De modo que os SIGs destinam-se, primordialmente, à gestão de informação enquanto o termo “geoprocessamento” designa sistemas voltados à realização de diversas tarefas simultâneas. Na bibliografia, entretanto, os dois termos costumam ser confundidos.

O advento desta tecnologia sofreu uma forte expansão, na medida em que foram surgindo, rapidamente, sistemas informatizados (*hardware* e *software*) cada vez mais inteligentes. Então, conforme vêm sendo descobertas novas aplicações para esta tecnologia, novos sistemas são projetados, alimentando o círculo de evolução.

As técnicas de geoprocessamento utilizadas neste trabalho, são descritas a seguir.

6.1.1 MODELAGEM DE DADOS

O emprego de geoprocessamento envolve, via de regra, modelagens de dados. Para tal, são utilizadas entidades e relacionamentos. Entidades significam o todo existente e relevante para a aplicação desejada. Os relacionamentos dizem respeito às relações do sistema a ser modelado. Associados, compõem um “modelo abstrato” de uma realidade. Nestes modelos, a realidade é observada como conjuntos de elementos relacionados de maneira sistêmica e representado por um outro, resultado da interpretação desejada, formado por um complexo de entidades e relações mútuas (Rodrigues, 1994).

A representação de sistemas reais em modelos abstratos faz uso da noção de abstração. Esta, auxilia a compreender o sistema, uma vez que se torna possível delimitar cada componente. Esta estratégia permite diminuir a complexidade de certos meios, por propiciar o estudo separado de cada componente. O sucesso da implementação, em computador, de modelos abstratos, depende da qualidade da transposição de entidades do mundo real e das interações reconhecidas (Davis e Borges, 1995).

Para a elaboração de modelos, existem técnicas de representação das referências espaciais, passíveis de automatização, que são denominadas “técnicas de geocodificação”. Estas são agrupadas segundo duas classes: matriciais (*raster*) e vetoriais (Rodrigues, 1990).

As representações vetoriais descrevem os domínios espaciais por um conjunto de traços, deslocamentos ou vetores adequadamente referenciados.

Nas representações matriciais, os domínios espaciais são definidos por células. Estas possuem geometria regular e usualmente reproduzem formas quadradas ou retangulares. As células contêm os pontos, linhas e áreas que se deseja modelar. A menor unidade definida em modelos *raster* são *pixels* (*picture element*). Estes, representam unidades discretas, indivisíveis, atreladas a pequenas áreas dentro do modelo ou imagem. O tamanho do *pixel* afeta a resolução, pois quanto menor for, mais detalhes ofertará a imagem.

As tonalidades de cores, ou de níveis de cinza, em uma imagem, estão associadas às propriedades do *pixel*. Técnicas de realce das imagens baseiam-se nos padrões estatísticos dos tons apresentados por eles (Quintanilha, 1990). Estas técnicas implicam na determinação e distribuição de médias de tonalidades, que através de matrizes podem homogeneizar ou destacar aspectos das entidades imageadas. As matrizes são definidas conforme o objetivo que se deseja alcançar. Usualmente, existem matrizes pré-definidas, nomeadas e reconhecidas por seu emprego corriqueiro. Mas, independente da frequência do uso, cada matriz representará um “filtro” que tem como função alterar, favoravelmente, uma imagem *raster*.

Tanto os recursos de representações vetoriais, como matriciais foram amplamente empregadas neste trabalho. Os métodos de transformações e realce de imagens tornou possível interpretações de feições de relevo, obliteradas por aspectos naturais ou antrópicas da área.

6.1.1.1 MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT)

A produção de modelos digitais de terreno (DTM - Digital Terrain Model ou DEM - Digital Elevation Model) surgiu através da necessidade de

aperfeiçoamento dos recursos de representação topográfica, aliado aos avanços da informática. A criação de um modelo digital de terreno corresponde a uma nova perspectiva de representação das paisagens e de elaboração de projetos. Existem duas concepções para a construção de modelos digitais (Cintra, 1990):

- a) Modelos que utilizam superfícies (equações analíticas): polinômios, séries de Fourier, *splines*.
- b) Modelos que utilizam redes de pontos: malha quadrada, retangular, triangular, etc.

Para a construção do modelo digital, apresentado neste trabalho, foi utilizado o conceito de “rede de pontos”.

As superfícies, produzidas através de equações, serão abordadas mais adiante (item 6.3, pg. 71).

Os métodos que empregam redes de pontos utilizam modelos de malhas discretas, pré-concebidas, que podem ou não coincidir com os pontos existentes. Para as redes triangulares, os pontos são unidos de maneira a formar uma triangulação aceitável, realizando-se interpolação na malha e desenhando-se as curvas de nível. Existem diversas opções de algoritmos para realizar a triangulação, sendo um dos mais empregados o de Delaunay (Cintra, *op cit*).

O método de triangulação de Delaunay, empregado para a construção do MDT neste trabalho, adota o princípio de que o triângulo a ser produzido deve satisfazer a exigência de poder estar contido em um círculo, o qual não deve envolver nenhum outro ponto, além daqueles que constituem os seus vértices (ARC/INFO, 1991).

A opção pelo algoritmo de Delaunay deve-se a algumas vantagens em relação aos demais (ARC/INFO, *op cit*):

- a) Os triângulos produzidos são tão equi-angulares quanto possível. Desta forma, reduzem problemas de precisão numérica, criados por triângulos de lados desproporcionais.
- b) Cada ponto da superfície estará tão próximo quanto possível de um vértice.
- c) A triangulação é independente da ordem dos pontos processados.

Modelos digitais de terreno são produzidos para finalidades diversas (Starr, 1990):

- gerar visões simuladas da paisagem;
- calcular a capacidade de reservação de um espaço vazio qualquer (um lago, por exemplo);
- avaliar determinados ambientes em relação às suas vocações naturais;
- auxiliar a prever fragilidades ambientais;
- calcular a declividade de terrenos para modelar processos hidrológicos que afetam a precipitação e a infiltração de água subterrânea, bem como do escoamento superficial.

Deve-se acrescentar, ainda, a possibilidade da realização de análises morfo-estruturais sobre modelos digitais.

Para a construção de DTMs, pode-se optar pela incorporação de dados de elevação, através de alguns tipos de entradas de dados (Starr, 1990):

- computação dos valores de elevação do terreno, a partir de dados de contorno de vetores digitalizados;
- escanização de estereomodelos obtidos por fotografias-aéreas;
- reamostragem de MDTs prévios de alta-resolução.

Neste trabalho, foi produzido um modelo digital de terreno para a área de estudo a partir da digitalização de curvas de nível, espaçadas a cada 10m, compiladas de mapas topográficos (COMEC, 1976) em escala 1:20.000. Além das curvas, foram também plotados valores de cotas altimétricas, através de pontos, para aferição de topos e baixios do terreno. O arquivo gerado em PC, foi transferido para uma Workstation (HP-750), que através do sistema ARC-INFO produziu um modelo digital de terreno. Sobre este, foram realizadas iluminações a partir de diferentes quadrantes para ressaltar as estruturas, que com a luz natural, tornam-se imperceptíveis.

Em seguida, as imagens do modelo digital foram transferidas para o ambiente DOS, onde, através de softwares apropriados ao tratamento de dados georeferenciados, como AUTO-CAD12, ROCKWARE, SURFER e IDRISI foram

introduzidos outros elementos relacionados aos aquíferos em investigação e superpostos ao MDT.

6.2 GEOESTATÍSTICA

6.2.1 GENERALIDADES

A geoestatística é a estatística das variáveis regionalizadas. Esta técnica é apropriada à investigação de entidades, cujas propriedades intrínsecas, associam resultados amostrais à funções de localização espacial de cada amostra. Isto significa que, teoricamente, a cada nova amostragem, resultados absolutamente discrepantes à média poderão ser encontrados. Este comportamento é atribuído à conotação espacial que os processos criadores/modificadores imprimiram a certos atributos de entidades naturais.

Caso a estatística tradicional fosse aplicada para obtenção de médias entre realizações amostrais, para entidades geológicas estruturadas, a extrapolação dos valores geraria representações falseadas do objeto, pois considerar-se-ia que as médias obtidas poderiam se repetir, com um certo desvio de tolerância, em qualquer novo ponto.

Para a pesquisa da água subterrânea, por exemplo, a extrapolação de médias aritméticas de vazões, em aquíferos fraturados, significa considerar que todos os condutos por onde a água circula possuem atributos hidráulicos cujos valores encontram-se relativamente próximos entre si, ou então, que a água circula da mesma forma, fora das fraturas. Um resultado deste tipo, confrontado com a realidade, não encontra sustentação, pois em áreas de aquíferos fraturados é corriqueira a vizinhança entre valores de vazão de dezenas de metros cúbicos e resultados nulos.

Considerando-se que a entidade pesquisada, em questionamento, apresenta variáveis cujo valor de cada amostra depende de sua localização espacial, pode-se afirmar que o produto numérico amostral é função do endereço espacial do ponto ou da área coletada. A amostra, desta forma, caracteriza uma “variável regionalizada”.

Há que se ressaltar, ainda, uma propriedade singular da geoestatística, qual seja, a informação dos erros associados aos valores estimados, possibilidade que inexistente em outros métodos.

6.2.2 APLICAÇÕES

A técnica geoestatística, nada mais é, que uma parte da estatística, desenvolvida para manusear variáveis de comportamento particular. Pode ser aplicada para as mais variadas entidades resultantes de fenômenos naturais, não apenas a problemas geológicos. Por sinal, etimologicamente, o termo “geoestatística” designa o estudo estatístico de fenômenos naturais (Journel e Huijbregts, 1978). De maneira mais elegante, a definição clássica da geoestatística afirma: “Geoestatística é a aplicação do formalismo das funções randômicas ao reconhecimento e estimação de fenômenos naturais” (G.Matheron, 1962, *apud* Journel e Huijbregts, 1978).

6.2.3 FUNDAMENTOS LÓGICOS BÁSICOS

O método geoestatístico baseia-se em uma conceituação lógica fundamental: se a função $z(x)$ representa o valor de uma variável “z”, no ponto “x”, como será possível estimar “z”, para novas posições de “x” no espaço, onde ainda não existem realizações? A solução geoestatística considera cada valor $z(x_i)$, como uma realização particular de uma variável randômica, $Z(x_i)$, no ponto x_i . O procedimento implica na correlação entre diversas variáveis do tipo: $Z(x_i)$, $Z(x_j)$, que representam funções randômicas {sendo: $Z(x)$, p/ “x” oscilando dentro de um domínio D} (Journel e Huijbregts, *op cit*).

6.2.4 FUNDAMENTOS CONCEITUAIS - GEOESTATÍSTICA PARA HIDROGEOLOGIA

A teoria geoestatística baseia-se na verificação de arranjos espaciais de variáveis regionalizadas, configurando estruturas particulares. A estruturação do fenômeno implica na correlação numérica das variáveis, cuja realização envolve

uma certa área em torno da zona de amostragem. Os extremos de abrangência desta área representam os limites de correlação estrutural do fenômeno.

Esta propriedade das variáveis regionalizadas é facilmente exemplificada em hidrogeologia: supondo $z(x)$, o valor da vazão de um poço tubular e $z(x + h)$, um outro valor de vazão para um novo poço tubular, distanciado “h” do primeiro (considerando-se que os projetos construtivos da obra são idênticos), a realização dos dois valores de “z” dependerão de propriedades intrínsecas ao aquífero, ou, dos processos geológicos que estruturaram a entidade. Por isto, também, as nuances estruturais do aquífero determinarão em quanto o valor de “h” interferirá na correlação entre os valores.

Se imaginarmos no exemplo anterior, que se está investigando um aquífero poroso em rochas sedimentares e que as variáveis são relativas a propriedades hidráulicas do aquífero, então a amplitude do fenômeno limitar-se-á à unidade sedimentar, hospedeira do aquífero, e a variável regionalizada apresentará estruturação ligada às variações laterais estratigráficas da unidade.

Por outro lado, se o exemplo envolver um aquífero fraturado, então poderemos imaginar que a variação de “h”, facilmente poderá ser suficiente para remeter a observação seguinte para um outro aquífero de um sistema de fraturas vizinho, o qual, eventualmente, possuirá relações com o primeiro. A estruturação do fenômeno, então, estará ligada aos processos que os geraram e a outros, subsequentes, que mantiveram as discontinuidades suficientemente permeáveis ao fluxo de água subterrânea. Em ambas as situações, a interpretação da estruturação das variáveis regionalizadas deverá considerar aspectos relativos aos controles geológicos dos aquíferos.

Para aquíferos fraturados, a independência entre realizações de $z(x)$ e $z(x + h)$, além de uma certa distância “h”, é sintomático para deduções sobre as dimensões da entidade investigada, afinal, a continuidade espacial destes aquíferos é muito mais irregular que em aquíferos porosos de rochas sedimentares.

6.2.5 ELEMENTOS PARA INTERPRETAÇÃO DAS FUNÇÕES

A geoestatística é uma técnica baseada em processos estocásticos¹, aplicada para a modelagem de fenômenos naturais, cujos aspectos estruturais e randômicos envolvidos pelas variáveis regionalizadas, melhor a expressam em linguagem probabilística, como uma função randômica (Journel e Huijbregts, *op cit*). Em seu estudo, é excluído o estudo matemático direto da função $z(x)$ em função da variabilidade espacial extremamente errática, dado pelas descontinuidades e anisotropias inerentes. Também descarta que os valores de $z(x)$, $z(x')$, sejam simplesmente interpretados como realizações independentes da mesma função randômica “Z”, por considerar a auto-correlação espacial entre as vizinhanças $z(x)$ e $z(x + h)$.

Exemplificando sobre aquíferos, atributos como: vazões, altitude potenciométrica, cotas das entradas d’água, etc., de diversos poços tubulares, podem ser vistos como variáveis randômicas $Z(x_i)$, de uma função randômica $Z(x)$, a qual está relacionada ao fluxo subterrâneo dos aquíferos. As variáveis observarão novas realizações a cada ponto “ x_i ”, dentro do domínio “D”, o qual representa os limites de uma entidade geológica, onde se encerram, por exemplo, aquíferos fraturados, de modo que: $Z(x) = \{Z(x_i), \forall x_i \in D\}$. As variáveis randômicas $Z(x_i)$ correlacionam-se, dependendo tanto do vetor “h” (módulo e direção), como da natureza da variável considerada. Para qualquer ponto x_i , o valor que irá assumir cada variável $z(x_i)$ será interpretada como uma amostra do sistema e representará uma realização particular da variável. De maneira similar, o posicionamento dos valores amostrados $\{z(x_i), \forall x_i \in D\}$ definirão o aquífero, ou a zona “D” é interpretada como uma realização particular da função randômica $\{Z(x_i), \forall x_i \in D\}$.

6.2.5.1 O VARIOGRAMA

A dependência esperada para valores de $z(x)$, em relação ao vetor “h”, é expressa na forma de uma função, denominada “função variograma” (Journel e

¹Estocástico = Processos dependentes de acontecimentos não determinísticos, cujo tratamento estatístico envolve o cálculo de probabilidades (Novo Dicionário Aurélio, 1988).

Huijbregts, 1978): $2 \gamma(x, h)$, que é definida como uma expectativa da variável randômica: $[Z(x) - Z(x + h)]^2$, desta forma:

$$2 \gamma(x, h) = \sum \{ [Z(x) - Z(x + h)]^2 \}$$

sendo (h) um vetor de módulo $|h|$ e direção “ α ”.

Para simplificação nos cálculos, durante a aplicação da equação variograma, esta foi reduzida a uma outra, denominada “semi-variograma” (Journel e Huijbregts, 1978):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \sum \{ [Z(x + h) - Z(x)]^2 / n \}$$

sendo “n” = número de pares.

A construção do variograma implica, pela execução da equação, na definição da função variograma ao longo de uma dada direção preestabelecida. A aplicação desta função é precedida pela escolha do valor de “h”. A varredura ao longo de diversas direções revelará o comportamento do fenômeno investigado no espaço. A análise estrutural do variograma indicará características como: anisotropia, continuidade, zona de influência, etc.

6.2.6 DETERMINAÇÃO DOS ERROS ASSOCIADOS - A VARIÂNCIA DE ESTIMAÇÃO

Considerando-se o erro produzido ao se estimar o valor de um ponto (x), em função de um outro amostrado (x + h), a variância de estimação deste erro define o variograma (Journel e Huijbregts, 1978). O linguajar geoestatístico nomeia o volume da amostra, a partir da qual se realizam estimações, como “suporte”. Um bloco de rocha, por exemplo, triturado e amostrado para geoquímica, representa um “suporte”, que é diferente do que representa o valor de um ponto amostrado para gravimetria, que será uma amostra pontual. A variância da estimação depende de quatro requisitos (Journel e Huijbregts, 1978):

- a) Distância relativa entre o bloco a ser estimado (V) e a informação usada para estimá-lo (v), que pode ser representado por: $\gamma(V, v)$;
- b) O tamanho e geometria do bloco (V) a ser estimado, ou seja: $\gamma(V, V)$;
- c) A quantidade e arranjo espacial da informação (v), igual a: $\gamma(v, v)$;
- d) O grau de continuidade do fenômeno estudado.

Estas condições se traduzem em:

$$\sum \{ [Z_V - Z_v]^2 \} = 2 \gamma(V, v) - \gamma(V, V) - \gamma(v, v)$$

6.2.7 INTERVALO DE CONFIANÇA

Apenas a consideração da variância de estimação não é suficiente para estabelecer intervalos de confiança para os resultados produzidos. A distribuição dos erros também deve ser conhecida. Normalmente é considerado o intervalo de confiança gaussiano de 95% ($\pm 2 \sigma_E^*$), sendo σ_E^2 a estimação da variância (Journel e Huijbregts, 1978).

6.2.8 ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural é o nome dado para o procedimento de caracterização das estruturas espaciais, associadas às distribuições das variáveis regionalizadas. É a primeira ação a ser tomada na aplicação do método geoestatístico.

Para a realização da análise estrutural é construído o variograma, que atua como uma sumarização quantificada de todas as informações estruturais disponíveis.

O método geoestatístico deve ser encarado como mais uma ferramenta que auxilia os trabalhos de dedução que o geólogo tenta executar sobre uma entidade. As informações obtidas através da análise estrutural, comparadas com dados de características físicas do objeto enfocado, acrescentam solidez às conclusões. Para situações onde a obtenção de informações diretas sobre o objeto é dificultada, o método geoestatístico auxilia a diminuir a dificuldade em se realizar amostragens. A variografia, completa e enriquece o conhecimento geológico do fenômeno, desde que o variograma quantifique a informação estrutural que será usada em procedimentos de estimação.

Neste ponto, é possível ressaltar a grande alternativa representada pela geoestatística, na demonstração de atributos relacionados a entidades geológicas, em relação a outros métodos matemáticos. Na delimitação de sistemas

aquíferos, por exemplo, mesmo que um acurado estudo sobre a geologia estrutural da área de interesse esteja disponível, e ainda que os mais diversos valores de amostragens tenham sido coletados, se a interpolação entre os valores for realizada a partir de métodos como o dos polígonos de influência, ou o método do inverso dos quadrados, as considerações sobre as particularidades geológicas serão desconsideradas. Isto porque estes métodos são aplicados de maneira automática, para qualquer entidade. A geoestatística, ao contrário, parte da determinação da estruturação existente, que está ligada a um fenômeno geológico, para então realizar previsões.

6.2.8.1 CONTINUIDADE

A continuidade da função variograma designa, conforme o comportamento espacial traduzido pela curva, a configuração do fenômeno.

Considerando uma dada direção “ α ” e um ponto de origem para a curva variograma, por exemplo, igual a zero [$\gamma(0) = 0$], o variograma aumenta, em geral, com o módulo $|h|$. Isto significa dizer que as diferenças existentes entre dois valores amostrados (tais como: dois valores de vazões), tendem a aumentar com a distância entre os pontos de coleta. Este conceito pode ser aplicado aos aquíferos, onde a anisotropia, geralmente, tende a aumentar com o incremento da distância. A maneira como a curva variograma cresce, a partir de pequenos valores de $|h|$, caracteriza o grau de continuidade espacial de diferentes variáveis estudadas (Journel e Huijbregts, *op cit*), ou mesmo a sobreposição de fenômenos estruturadores sobre uma mesma entidade.

6.2.8.2. ZONA DE INFLUÊNCIA

O termo “zona de influência” expressa o alcance de uma estrutura determinada, para uma dada direção espacial. Esta, correspondente a “ α ”, expressa pela curva variograma, pode tornar-se estável, além de uma certa distância $|h|$. Neste caso $|h| = “a”$, é denominado alcance (*range*). Além deste ponto, na curva variograma, o desvio quadrático médio entre dois pontos

* σ_E = Desvio-padrão do erro.

[$z(x)$ e $z(x + h)$] não depende mais da distância entre eles e suas realizações passam a não ser correlacionáveis.

6.2.9 COMPORTAMENTO DO MEIO

A entidade investigada pode se comportar de maneira isotrópica ou anisotrópica, ao longo das direções variografadas. Esta propriedade depende do “alcance” (“a”) determinado para cada direção espacial. Obviamente, quando “a” não variar, o meio é isotrópico.

6.2.9.1 IMPLICAÇÕES DAS ZONAS DE INFLUÊNCIA SOBRE MEIOS ANISOTRÓPICOS

Considerando-se a execução de uma análise estrutural geoestatística sobre aquíferos fraturados, poderemos deduzir, de início, que dificilmente encontraremos valores de “a”, indicativos de meio isotrópico.

Aquíferos limitados a fraturas em rochas maciças, naturalmente, apresentam diversos atributos com distribuição espacial não-uniforme. Quando uma destas variáveis for examinada, a curva variograma revelará, obviamente, maior zona de influência para uma direção do que para outra. Considerando-se este princípio e imaginando que a posição espacial das fraturas que controlam o aquífero, por um motivo qualquer, seja desconhecida, pode-se deduzi-la a partir do comportamento da curva variograma. As diferenças entre as zonas de influência, no variograma, serão reveladas pela leitura do valor do alcance (figura 14). Quando a curva estiver variografando paralelamente à direção principal da fratura, a zona de influência determinará o máximo valor de alcance. De maneira inversa, quando for variografado os limites mais estreitos do aquífero, a zona de influência será mínima. Desta forma, através do exame estrutural geoestatístico, será possível determinar a dimensão dos aquíferos examinados.

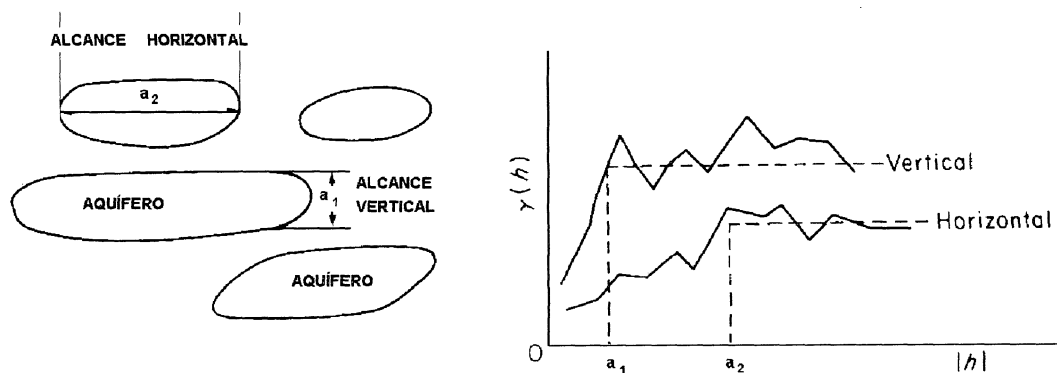


Figura 14 - Anisotropia estrutural expressa em um variograma (modificado de Journel e Huijbregts, 1978)

6.2.10 ELEMENTOS DO VARIOGRAMA

Em um variograma, existem alguns elementos fundamentais (figura 15):

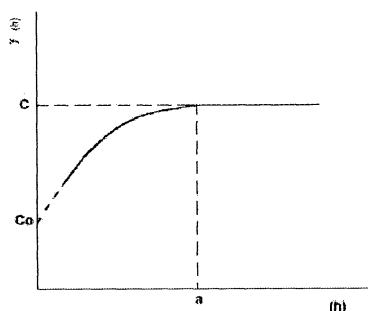


Figura 15 - Variograma genérico e elementos envolvidos.

$\gamma(h)$ = semi-variograma;

(h) = distância (ou unidade de variação espacial envolvida na função variograma);

a = alcance (ou *range*), corresponde a distância, a partir da qual, as realizações são independentes entre si;

C_o = efeito pepita (ou *nugget*)

C = patamar (ou *sill*)

O “efeito pepita” representa a possibilidade da ocorrência de uma realização surpreendente na amostragem, muito diferente da evolução dos valores

médios. Em mineração, é fácil perceber a anomalia. Quando entre amostras de minério aurífero, apenas uma contém pepitas, aquela elevará sobremaneira o teor pontual. Em hidrogeologia pode representar, para aquíferos fraturados, a possibilidade de uma única perfuração, entre várias, interceptar um cruzamento entre fraturas. Neste caso, apenas esta apresentaria valor de vazões excepcionais.

A definição do “efeito pepita” configura a influência residual de todas as variabilidades que possuem alcance muito menor do que a distância empregada nas observações. O efeito pepita aparecerá no variograma, como uma aparente descontinuidade na origem (Journel e Huijbregts, *op cit*).

O termo “patamar” (ou *sill*), representa a variância *a priori*. É o valor de $\gamma(h)$, a partir do qual ocorre a dispersão dos valores até então estruturados.

6.2.11 ANÁLISE ESTRUTURAL E MODELIZAÇÃO

A realização da análise estrutural, em geoestatística, implica na determinação de modelos que caracterizam a estrutura espacial da variável regionalizada.

Os modelos teóricos dividem-se em duas classes (Journel e Huijbregts, *op cit*):

a Modelos com patamar ou modelos transicionais (figura 16):

a.1 Com um comportamento linear na origem:

a.1.1 Modelo Esférico (ou de Matheron) definido pela equação:

$$\gamma(h) = C\left(\frac{3a}{2h} - \frac{1}{2}\frac{h^3}{a^3}\right) + C_0$$

a.1.2 Modelo Exponencial (ou de Formery)

$$[\gamma(h) = 1 - \exp(-\frac{h}{a})]$$

a.2 Com um comportamento parabólico na origem:

a.2.1 Modelo Gaussiano

$$[\gamma(h) = 1 - \exp(-\frac{h^2}{a^2})]$$

a.2.2 Efeito *Nugget* [$\gamma(h) = 0$]

b Modelos sem patamar

b.1 Modelo Logarítmico (ou de De Wijsian) [$\gamma(h) = \log h$]

b.2 Modelo Linear

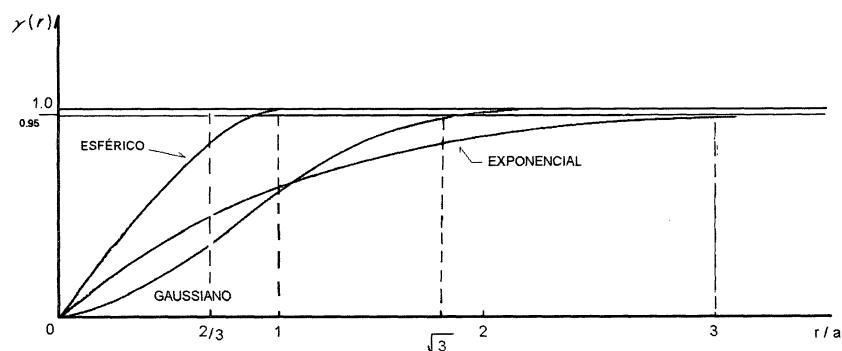


Figura 16 - Modelos de variogramas com patamar (Journel e Huijbregts, 1978).

Um modelo de particular importância na área em estudo, é um tipo especial e recebe o nome de “modelo efeito-buraco”. Este modelo, que na verdade é um comportamento anômalo da curva variograma, manifesta-se sobre qualquer modelo anteriormente citado e é caracterizado por uma evolução descontínua do variograma $\gamma(h)$ (figura 17).

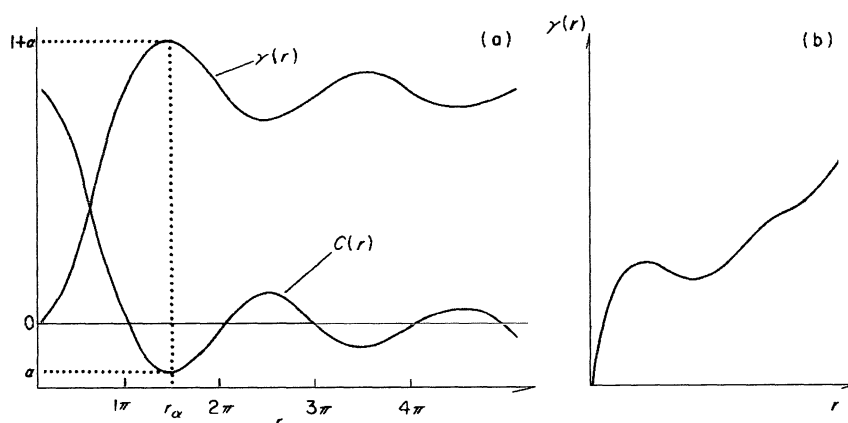


Figura 17 - Manifestação do “efeito buraco” sobre variogramas (a) com patamar, (b) sem patamar (Journel e Huijbregts, 1978).

Este comportamento se manifesta devido a particularidades inerentes ao fenômeno investigado, ou a características da amostragem. No primeiro caso, por exemplo, uma sequência estacionária de dois tipos bem definidos de mineralização se manifesta em uma mesma jazida mineral. Em hidrogeologia, pode-se imaginar um aquífero em investigação, onde o controle estrutural foi estabelecido por fenômenos deformadores superpostos no tempo, com elipsóides de deformação defasados entre si. A amostragem pode provocar efeito buraco, no variograma, em uma situação em que uma malha de amostragem for completada por uma segunda, cuja dimensão é metade da primeira. Ocorrerá uma heterogeneidade na amostragem, que se manifestará de maneira “regular” e gerará efeito buraco no variograma.

6.2.12 KRIGAGEM

A krigagem é a etapa final do trabalho de estimação geoestatística. É a técnica de estimação local que fornece o melhor estimador linear não-tendencioso (BLUE - best linear unbiased estimator, conforme Journel e Huijbregts, *op cit*). Este método fornece:

- a) Um estimador Z_K^* ;
- b) Uma variância de krigagem igual a zero, ou seja, $\sigma_K^2 = 0$

Supondo a necessidade de se estimar um volume, área ou ponto de determinada entidade, onde o valor real é desconhecido, e estes poderão, então, ser representados por “Z(x)”. O valor estimado será Z_K^* , o qual será calculado analisando-se “n” amostras, localizadas segundo $z_1, z_2, z_3, \dots, z_n$, denominado “D”. Associado a Z_K^* existe um erro intrínseco: $E = Z(x) - Z_K^*$, de modo que a confiabilidade de Z_K^* será inversamente proporcional ao valor de “E”. Por outro lado, a distribuição dos valores de “E” dará a verificação necessária de Z_K^* .

Nesta técnica, novamente o variograma (ou semi-variograma) é empregado, para fornecer o valor da variância média. Em seguida, compara-se o valor de cada ponto de amostragem com cada ponto da área, encontrando-se a

média destes valores. Funções auxiliares fornecerão a variação dos valores de todos os pontos dentro da área (Landim, 1985).

O procedimento da krigagem segue os seguintes passos:

a) Calcula-se o valor estimativo do valor de um ponto na área:

$$Z_K^* = \lambda_1 Z_1 + \lambda_2 Z_2 + \lambda_3 Z_3 + \dots + \lambda_n Z_n$$

onde λ = peso atribuído a $Z(x)$.

Se a soma dos pesos (λ) for igual a 1 e não ocorrer tendência local, o estimador será o melhor e não-tendencioso. A partir de λ , pretende-se minimizar a estimativa da variância. Para isto, deve ser construído um sistema de “n” equações, com “n” incógnitas.

O método de krigagem é empregado para (Landim, 1985):

- a) realizar previsões sobre valores pontuais de uma variável regionalizada, em um determinado ponto dentro do campo geométrico;
- b) calcular o valor médio de uma variável regionalizada extrapolada para além do suporte geométrico. Por exemplo, o teor de minério determinado à partir de testemunhos de sondagens;
- c) estimação do resíduo (*drift*) de modo mais confiável que na análise de superfícies de tendência.

A superfície de krigagem determinada “passa através dos pontos experimentais” e nenhum outro procedimento matemático possui esta propriedade, especialmente aqueles baseados no método dos mínimos quadrados (Journel e Huijbregts, *op cit*).

Se $Z(x)$ representa uma função randômica, a qual possui uma estacionaridade de segunda ordem, esta apresentará uma expectativa de:

$\sum \{Z(x)\} = m$, sendo “m” uma constante desconhecida. Se:

Z_v = valor variograma médio estimado;

Z_K^* = um estimador linear

A condição para se obter um estimador com expectativa zero de erro, ou seja,

$[Z_v - Z_K^*]$ é dada pela imposição de:

$$\sum^n_{\alpha=1} \lambda_{\alpha} = 1$$

onde λ_α representa um peso associado ao estimador, e:

$$\sum \{ Z_k^* \} = m \sum \lambda_\alpha = m = \sum \{ Z_v \}$$

6.2.13 RECURSOS DE PROCESSAMENTO UTILIZADOS

Para a geração de resultados geoestatísticos foram utilizados essencialmente dois *softwares*, em ambiente DOS:

GEO-EAS (Geostatistical Environmental Assessment Software, v.1.2.1, 1988);

GS-LIB (GS-LIB, v. 1.4, 1993).

6.3 ANÁLISE DE SUPERFÍCIES DE TENDÊNCIA

A existência de uma bacia sedimentar pode ser suficiente para superpor desvios às variáveis investigadas, em virtude da deformação do substrato da bacia, devido à subsidência.

A análise estrutural geoestatística, neste caso, acusa uma tendência superposta, derivada do mergulho dos estratos da bacia. Para remover os efeitos desta anomalia adicional, recorre-se ao método de “análise de superfícies de tendência”.

A reprodução de uma superfície qualquer, através de meios analógicos, remonta à necessidade de avanço das técnicas de representação topográfica, já abordadas anteriormente (item 6.1.1.1).

Uma das alternativas envolve a construção de uma superfície através de equações analíticas. Este método consiste na adequação da superfície do terreno a uma função contínua “z” (x, y) de maneira a se adaptar ao máximo aos pontos determinados (Cintra, *op cit*).

Qualquer superfície pode, teoricamente, ser reproduzida por uma equação matemática. Entretanto, para superfícies muito irregulares, o polinômio teria ordem muito elevada e apresentaria limitações de aplicação.

Ao se reduzir o grau do polinômio, aumenta-se os desvios em relação à superfície original. Para minimizar este problema emprega-se a técnica dos mínimos quadrados (Cintra, *op cit*). Desta forma, as curvas de nível correspondem a linhas de intersecção de planos horizontais com a equação da superfície.

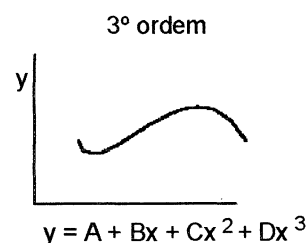
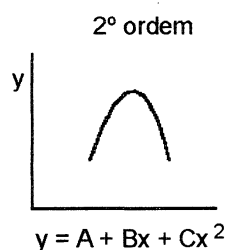
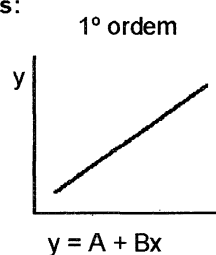
O fenômeno de “tendência” aqui referido, significa qualquer variação sistemática com propensão definida a uma dada direção, observada na realização de resultados de uma função randômica. A análise de superfícies de tendência pode ser definida como: “um procedimento segundo o qual as observações de um mapa são divididas em conjuntos, conforme estejam associados a mudanças de larga escala, ou a pequenas flutuações não-sistemáticas, que se superimpõem aos de maior escala” (Fúlfaro, 1971).

Uma superfície tridimensional possui descrições correspondentes de equações com grau “n” de exponenciais. Cada uma delas assume formas sequenciais (figura 18):

- equação para superfície de primeiro grau: $Z = A + Bx + Cy$ (plano)
- segundo grau: $Z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2$ (superfície parabolóide)
- terceiro grau: $Z = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3$
(superfície oscilatória ou duplamente sinusoidal)

e assim por diante...

Duas dimensões:



Três dimensões:

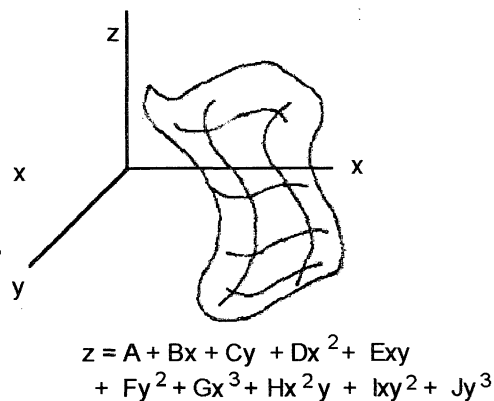
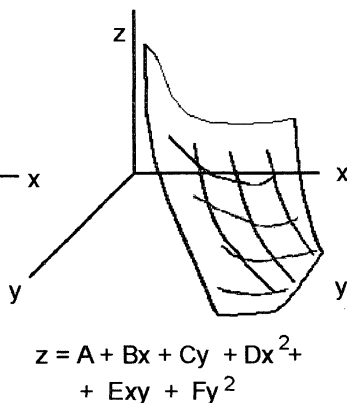
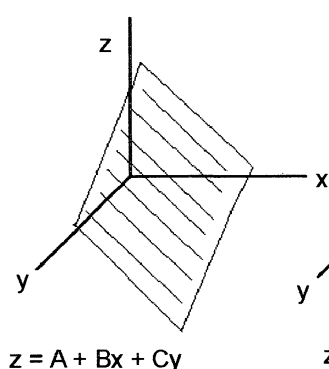


Figura 18 - Relações geométricas das equações de 1º, 2º e 3º graus, para duas e três dimensões (Lustig, 1969, in Fúlfaro, 1971).

A aplicação do método implica na adaptação de um polinômio que melhor se ajuste à superfície em análise. Esta escolha depende da complexidade da superfície, dos padrões morfológicos por ela reproduzidos. A aplicação do método implica na geração de uma nova superfície, definida pelo polinômio, que será a mais adequada, ou a mais próxima da original. Além da nova superfície, suavizada, produz-se também resíduos, correspondentes às diferenças entre os valores originais e os da superfície, em cada ponto de observação, agora ajustada, cujos valores oscilam em torno da mesma.

6.4 GEOFÍSICA

Os métodos geofísicos costumam ser de grande valia na pesquisas para água subterrânea, tendo se tornado um recurso quase obrigatório nestes trabalhos. No local das pesquisas, infelizmente, poucos métodos são passíveis de aplicação. Os métodos eletromagnéticos sofrem severas restrições, em função da malha de energia elétrica que cobre a cidade de Curitiba e arredores. O campo magnético gerado pela rede elétrica produz um número tal de ruídos nos resultados que inviabilizam a aplicação daqueles métodos.

Outros métodos geofísicos, como a perfilagem elétrica em poços tubulares, proporcionaria a obtenção de resultados importantes, mas os custos relativos a sua aplicação e o tempo necessário à realização, estariam fora do escopo deste trabalho.

A gravimetria, ao contrário, oferece resultados interessantes na área de pesquisa e está, aparentemente, livre de interferências urbanísticas. Além disto, já existe um número considerável de medições realizadas na área de trabalho, facilitando o seu emprego.

A importância da aplicação do método gravimétrico relaciona-se à existência de uma bacia sedimentar na área de pesquisa. A modelagem geofísica pode fornecer indicativos sobre a discordância existente entre os sedimentos da bacia e o Embasamento Cristalino e revelar ainda, descontinuidades existentes neste último.

Os dados gravimétricos refletem contrastes de densidade entre as litologias. A modelagem dos dados pode revelar a superfície que limita rochas de diferentes densidades, ou seja, o limite entre a base dos sedimentos da Formação Guabirotuba e o Embasamento Cristalino. A forma da superfície obtida pode revelar nuances da configuração geotectônica da área, como o tipo de bacia e estruturas predominantes.

6.5 HIDROGEOQUÍMICA

O estudo das características hidrogeoquímicas dos aquíferos importa tanto para o conhecimento do grau de potabilidade, como para diversas variáveis relacionadas ao funcionamento dos sistemas aquíferos.

A afluência das águas aos aquíferos, quer através de infiltração superficial ou da intercomunicação com outros aquíferos, permite desenvolver, em seu deslocamento, processos de transporte de massa. Estes, ocorrem a partir de diversas reações, como:

- advecção e dispersão;
- reações ácido-base;
- solubilização, volatilização e precipitação;
- complexação;
- reações de sorção;
- reações de oxidação e redução;
- reações de hidrólise;
- reações isotópicas

O conceito de massa está associado ao teor, nas águas, de íons, moléculas e partículas sólidas (Domenico e Schwartz, 1990).

A composição das rochas hospedeiras, as características físico-químicas do fluido e o tempo de residência nos aquíferos determinam a oscilação das proporções de massa nas águas subterrâneas.

Utilizando-se raciocínio inverso, pode-se compreender as relações de equilíbrio dos aquíferos a partir do exame da composição hidroquímica das águas amostradas e, também, deduzir inter-relações entre sistemas aquíferos.

Neste trabalho, as propriedades hidroquímicas foram, inicialmente, levantadas a partir do exame da qualidade e da mistura de águas entre aquíferos. Para tanto foi empregado o diagrama de Piper (1944, in Custodio e Llamas, 1983). Este método, relaciona o conteúdo dos “íons maiores”: Ca^{++} , Na^+ , Mg^{++} , K^+ , $\text{CO}_3^{=}$, $\text{SO}_4^{=}$, Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- em diagramas ternários. Cada ponto no diagrama representa a concentração, em miliequivalente/litro, de uma amostra de água. Concentrações de pontos em partes localizadas do diagrama demarcam zoneamentos dos aquíferos ou fácies hidrogeoquímicas.

A tipologia das fácies, a disposição espacial dos aquíferos e a composição geoquímica das rochas onde as águas transitam, permitiram visualizar a qualidade das águas, sugerir relações entre aquíferos e deduzir nuances do fluxo subterrâneo, na área de pesquisa.

A inter-relação dos valores de concentração de algumas variáveis hidrogeoquímicas foi realizado através do cálculo de superfícies de tendência. Os produtos gerados indicaram padrões do fluxo das águas subterrâneas na área de pesquisa.

7 - RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos com a aplicação dos métodos selecionados foram itemizados para cada variável a fim de individualizar comportamentos distintos, tendo sido integrados ao final.

7.1 LINEAMENTOS ESTRUTURAIS EM FOTOGRAFIAS AÉREAS

O controle estrutural das entidades geológicas e por extensão dos aquíferos, foi, tentativamente, reconhecido através do mapeamento de lineamentos estruturais. Estas feições foram investigadas em superfície, tentando rastrear feições de relevo associadas à estruturação do substrato. Para tanto, foram assinalados traços estruturais detectados no terreno e revelados através de cartas topográficas e de imagens obtidas por sensores óticos.

Os lineamentos foram traçados sobre drenagens (figura 19) e fotografias aéreas (figura 20).

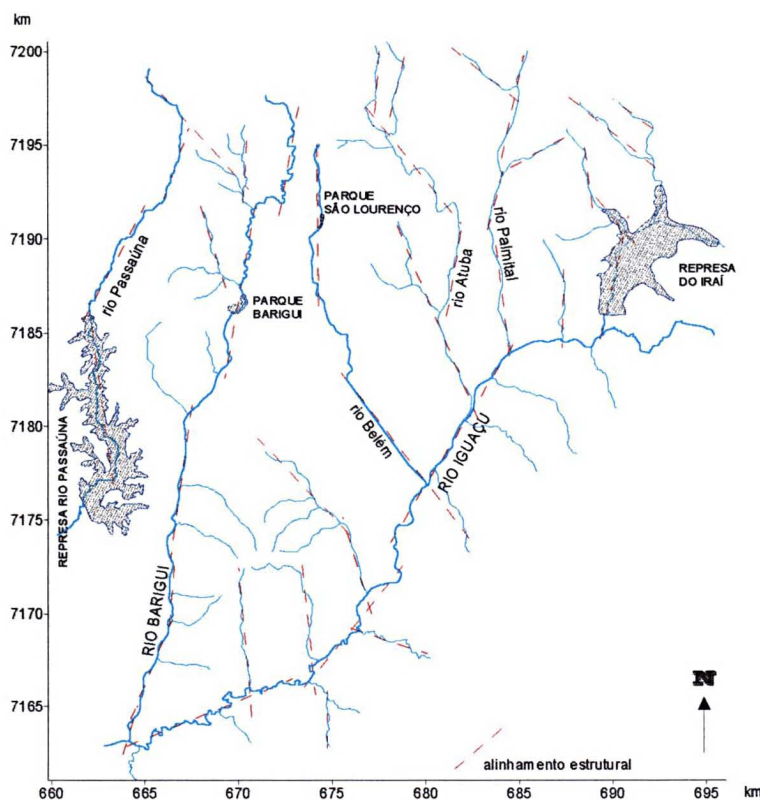


Figura 19 - Alinhamentos estruturais traçados sobre as principais drenagens da área (coordenadas em UTM).

Sobre fotografias-aéreas, os alinhamentos foram assinalados em escala 1:70.000 (figura 20).

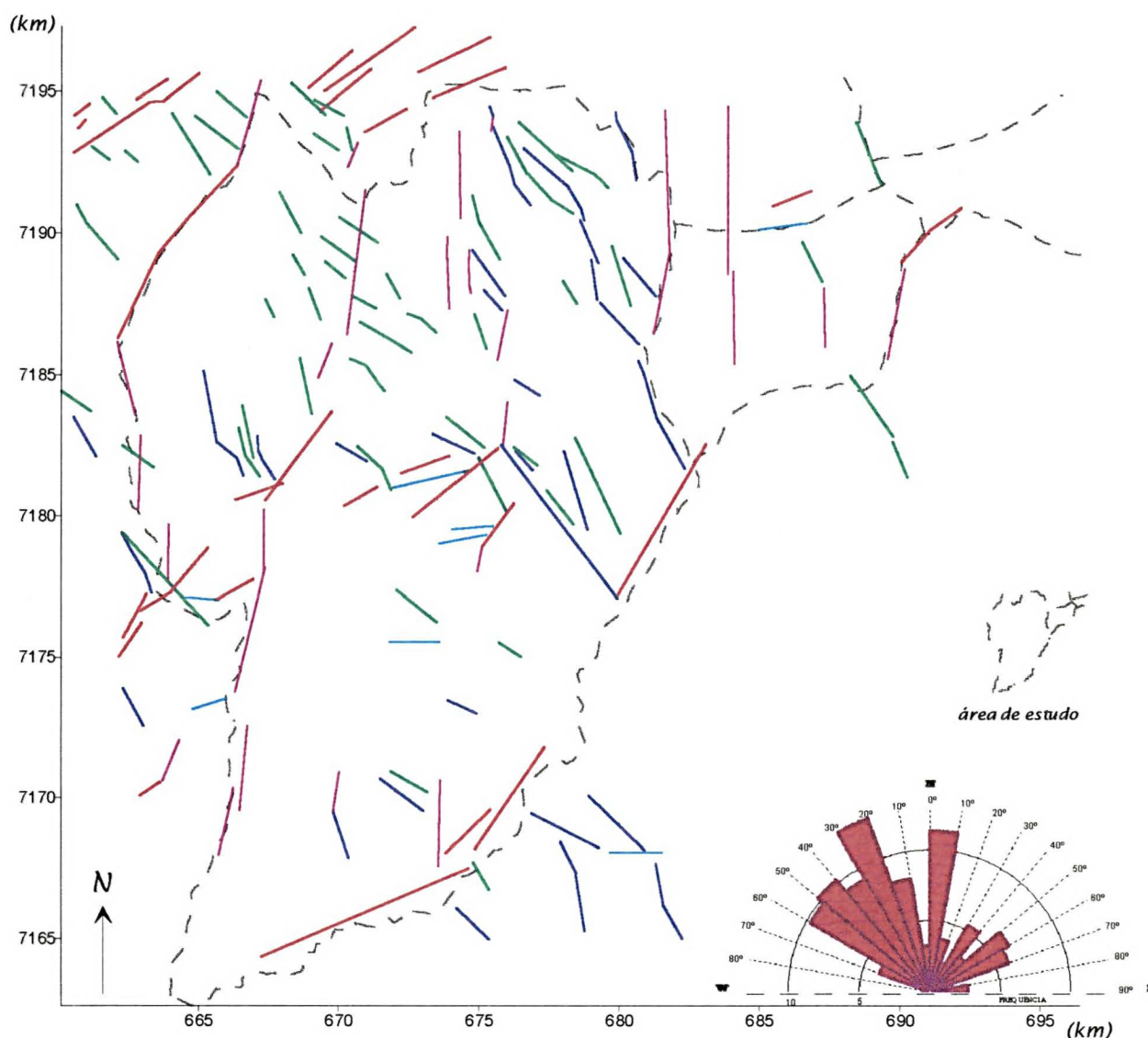


Figura 20 - Alinhamentos estruturais traçados sobre fotografias-aéreas - escala 1:70.000. As cores dos traços indicam as direções dos lineamentos: vermelho = NE; rosa = N; verde = lineamentos determinados por altos do terreno no sentido NW; azul claro = E-W; azul escuro = lineamentos determinados por baixos do terreno no sentido NW, (coordenadas em UTM). No canto inferior direito da figura observa-se diagrama representando as frequências dos traços estruturais, destacando-se as direções NW e N. As direções reconhecidas correspondem, respectivamente, às direções regionais designadas (Soares, 1992): Pitanga (ENE), Médio Paraná (NE), Tapirapui (NS), Goioxim (NNW), Ivaí (NW) e Paranapanema (NW).

7.2 MODELO DIGITAL DE TERRENO

Os aquíferos da área de pesquisa ocorrem, predominantemente, em rochas fraturadas do Embasamento Cristalino. As imagens de superfície da área de pesquisa, ressaltam a estruturação das rochas aflorantes, marcadas por sistemas orientados de fraturas. Torna-se evidente, então, a importância da detecção e georeferenciamento dos lineamentos em superfície, para correlação com os produtos gerados pelo tratamento das demais variáveis dos sistemas aquíferos.

Entretanto, a investigação da área implica em algumas dificuldades. A região encontra-se densamente habitada e o rastreamento de estruturas geológicas torna-se dificultado pelas edificações e transformações urbanísticas da paisagem.

Tentando contornar esta dificuldade, foi construído um modelo digital de terreno. Este foi obtido através da interpolação de dados de curvas de nível e de cotas altimétricas do terreno, previamente digitalizados. Os valores de altimetria do terreno foram compilados de mapas topográficos, escala 1:20.000 (COMEC, 1976), cujas curvas de nível são equidistantes a cada 10 metros. Para efeito de correção de porções espaçadas do terreno, ou de feições como depressões ou cumes de elevações, procedeu-se à digitalização de pontos de aferição, medidos no terreno (COMEC, 1976). Os arquivos gerados foram transportados para uma workstation (HP 750); através do sistema ARC-INFO[®], foram produzidas interpolações para geração do modelo digital de terreno. O método utilizado emprega o sistema de triangulação de Delaunay, descrito no capítulo 6.

Para a visualização do modelo digital de terreno (figura 21), foi adotado para gridagem, células com dimensões de 250m de lado e exagero vertical igual a 10 vezes. Outros valores de proporções, por exemplo, utilizando-se exageros menores, diminuem o contraste topográfico no terreno, ou então com células de dimensões maiores que 250m, reduzem substancialmente detalhes de relevo da superfície.

O modelo digital de terreno foi combinado com outros atributos da área de pesquisa. Desta forma, é possível reconhecer porções do terreno e realizar comparações com a realidade, testando a qualidade do modelo.

A superposição das principais drenagens, da área de pesquisa, com o modelo digital, destaca a linearidade de certos cursos d'água. Alguns destes lineamentos ressaltam no modelo digital, zonas homólogas de relevo, a exemplo das porções direita e esquerda do rio Barigui (figura 22).

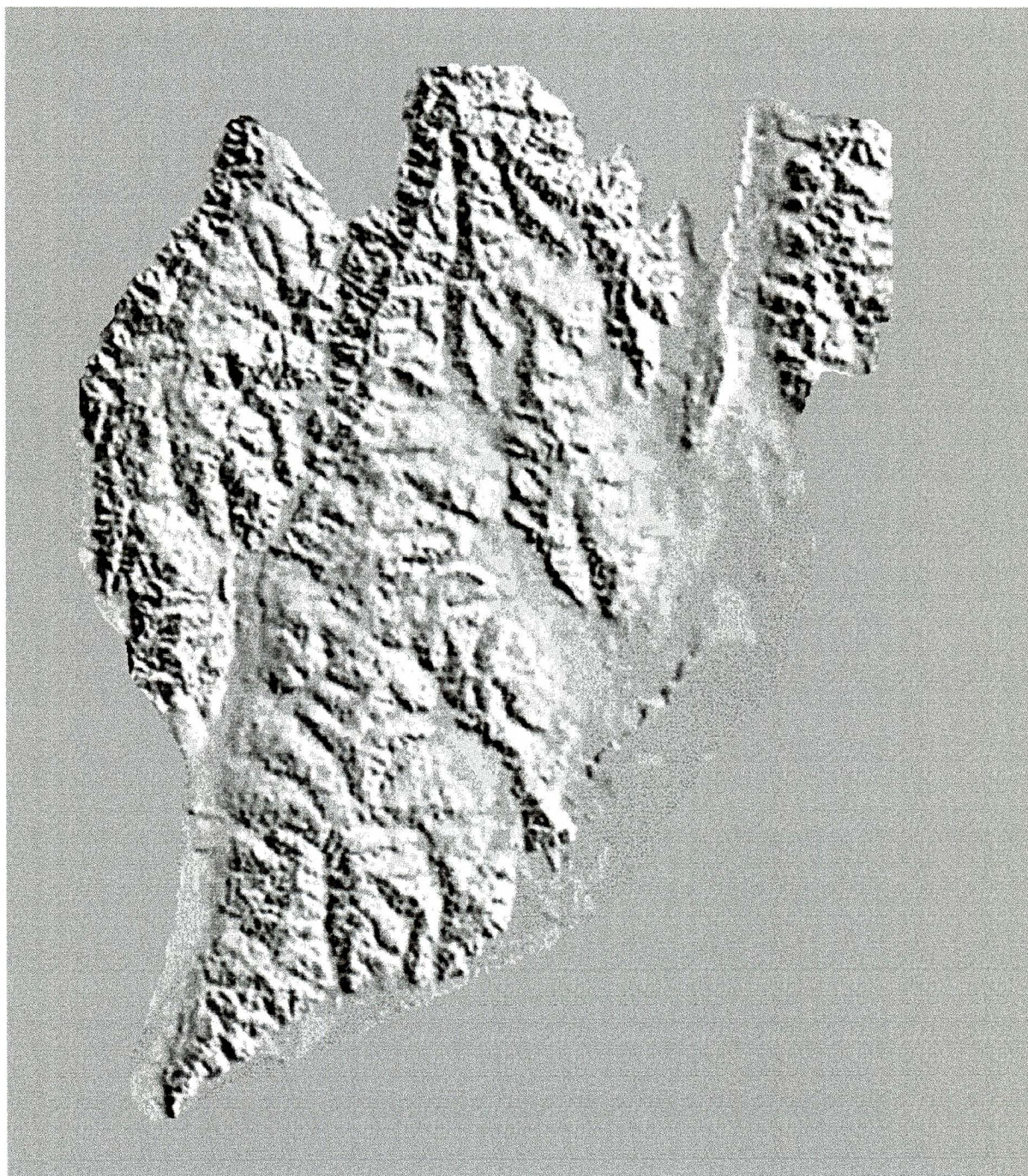


Figura 21 - Modelo digital de terreno, construído a partir da digitalização de curvas de nível (COMEC, 1976) espaçadas a cada 10m e de pontos com cotas altimétricas para aferição. A iluminação está posicionada no sentido nordeste (N30E) - sudoeste. A sobrelevação de terreno adotada foi igual a 10 vezes (produzido através do sistema ARC-INFO em workstation HP-750).

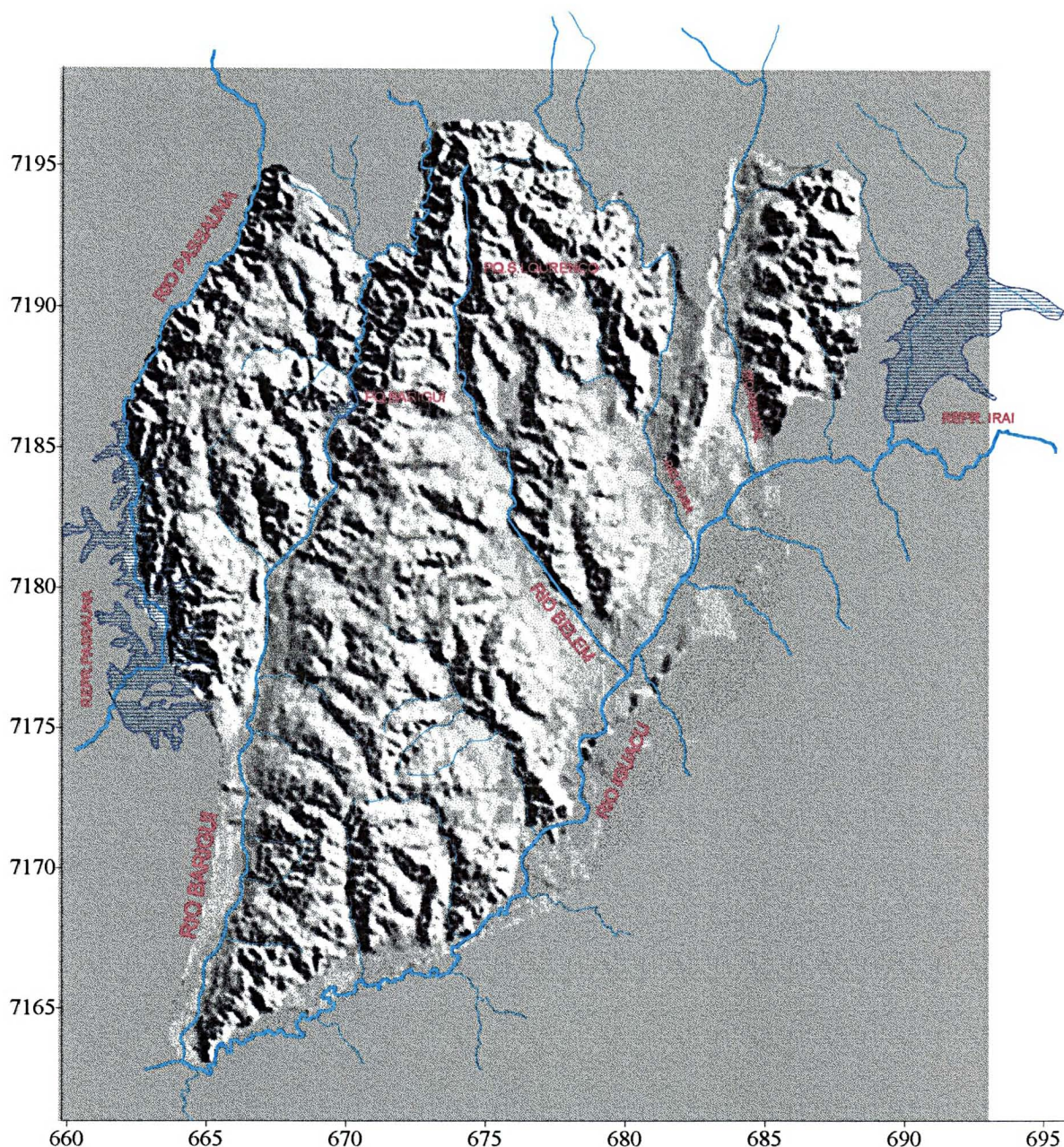


Figura 22 - Superposição das principais drenagens ao modelo digital de terreno (iluminação do modelo no sentido NE-SW), as coordenadas estão relacionadas em UTM (utilização do *software* SURFER™).

Foram associados ainda, ao modelo digital, a título de facilitar a localização ao leitor, o contorno dos principais bairros da cidade e os limites dos municípios vizinhos, alvo das pesquisas (figura 23).

Da mesma forma, foi realizada a sobreposição dos arruamentos e das principais vias de acesso, com o modelo digital de terreno (figura 24).

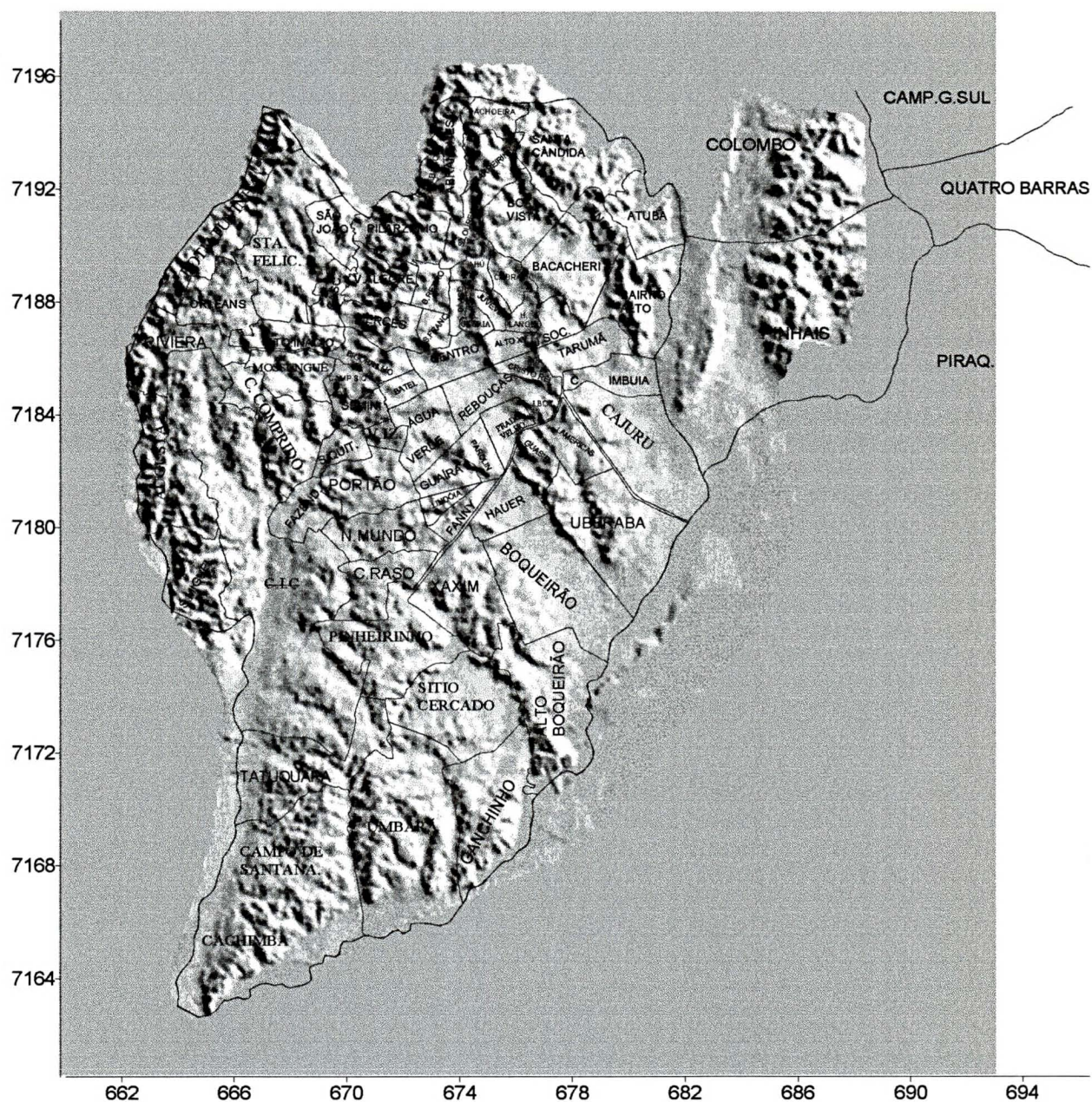


Figura 23 - Modelo digital de terreno com as divisões administrativas das áreas de estudo.

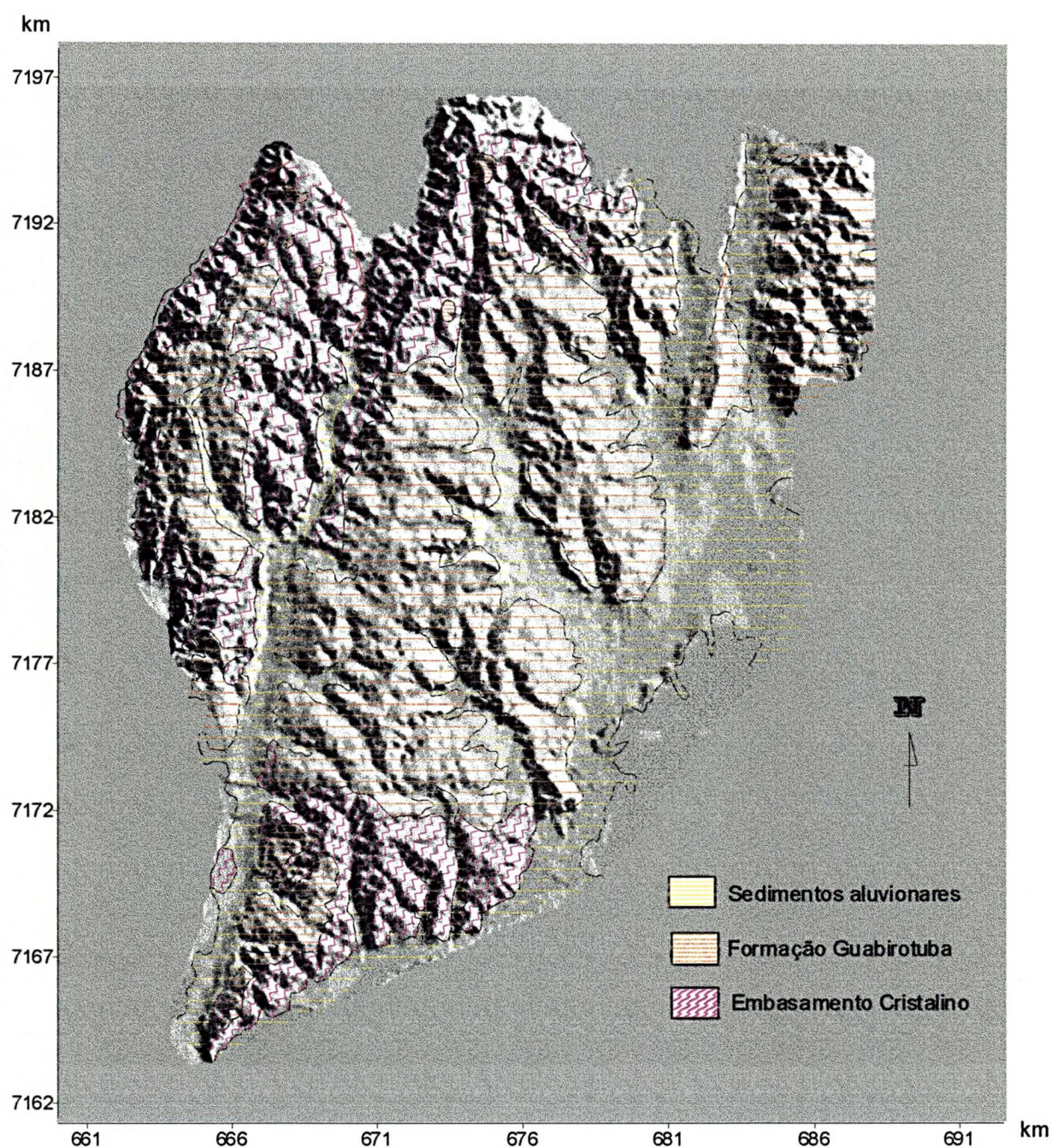


Figura 25 - Mapa geológico da área sobreposto ao modelo digital de terreno.

Para ressaltar direções estruturais, invisíveis ou dificilmente visíveis em imagens convencionais, foram obtidas imagens do MDT com visada vertical e iluminação de diferentes direções (figuras 26 e 27).



Figura 26 - Modelo digital de terreno com iluminação segundo azimuth 270° , ressaltando lineamentos N-S.



Figura 27 - Modelo digital de terreno, com iluminação no azimuth 330°, ressaltando direções NE.

7.2.1 ALINHAMENTOS ESTRUTURAIS SOBRE O MODELO DIGITAL DE TERRENO

Os alinhamentos estruturais, foram ressaltados no modelo digital de terreno por traços, executados sobre imagens com diferentes direções de iluminações (figuras 28, 29 e 30).

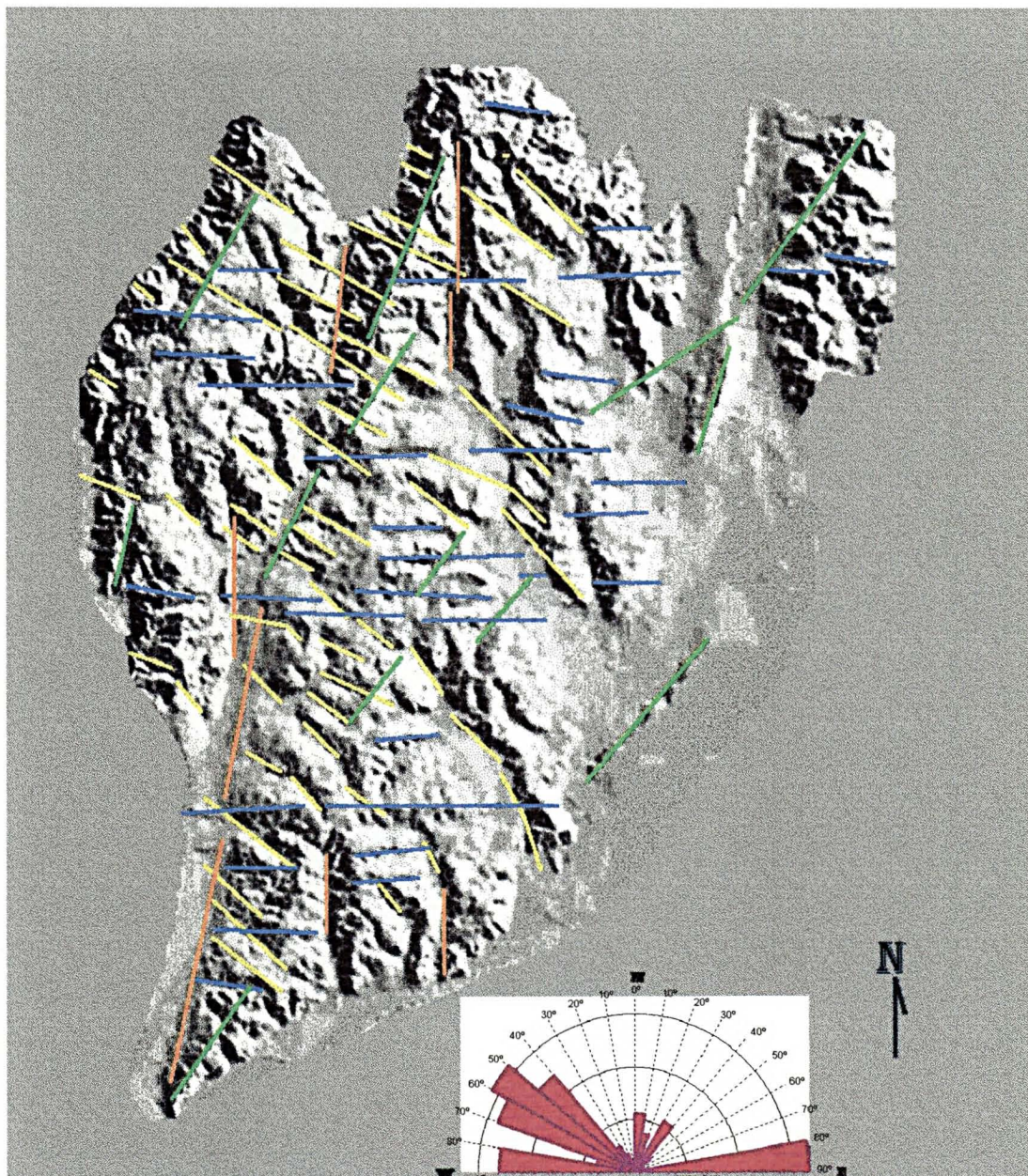


Figura 28 - Destaque de alinhamentos estruturais sobre modelo digital de terreno. Iluminação no azimuth 30°. Tonalidades de traços diferentes, marcam direções definidas: amarelo, quadrante NW; alaranjado, direção \cong NS; verde, quadrante NE; azul, direção E-W.

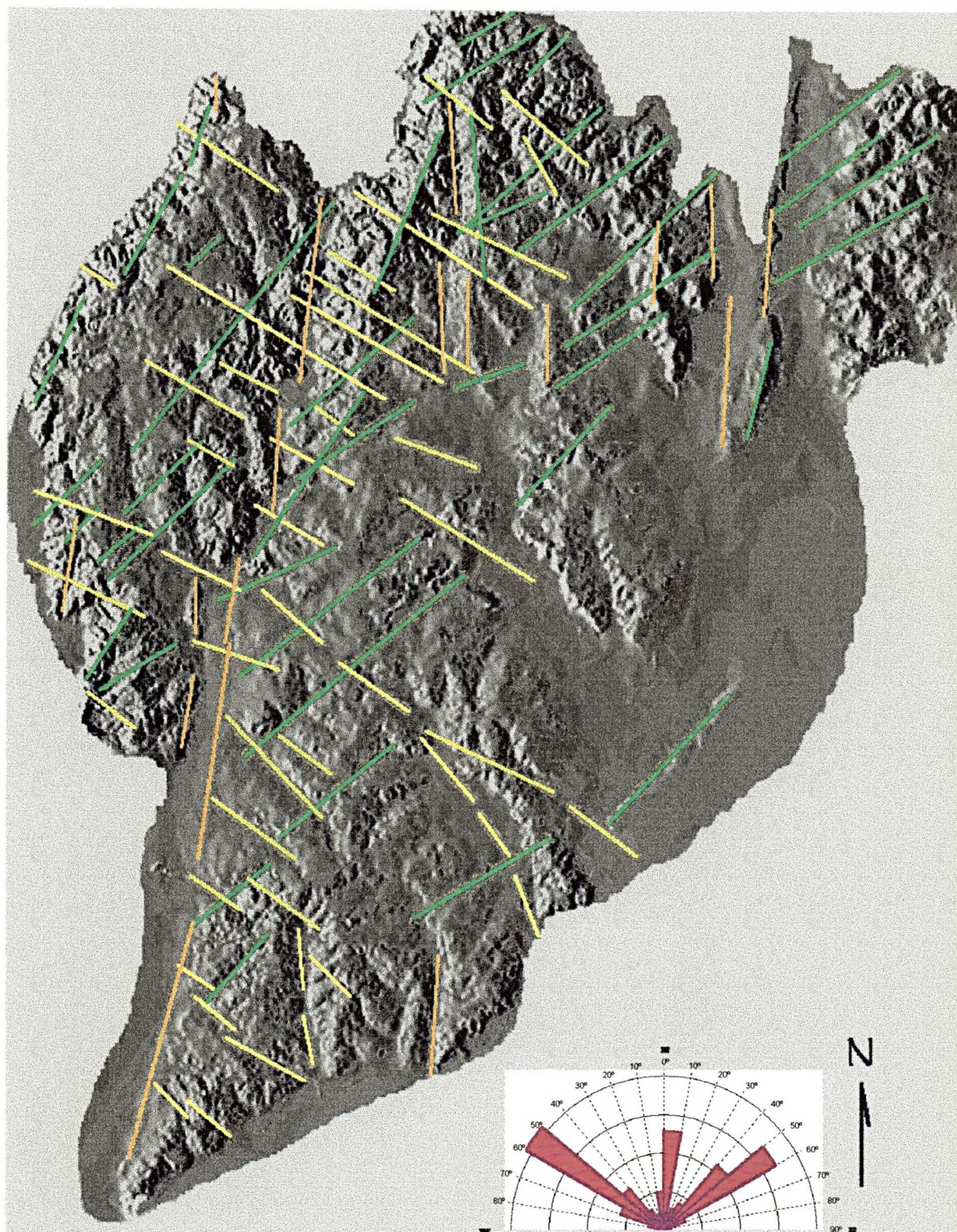


Figura 29 - Traços estruturais sobre modelo digital de terreno. Iluminação no azimute 270°. Tonalidades de traços diferentes, marcam direções definidas: amarelo, quadrante NW; alaranjado, direção \cong NS; verde, quadrante NE; azul, direção E-W.

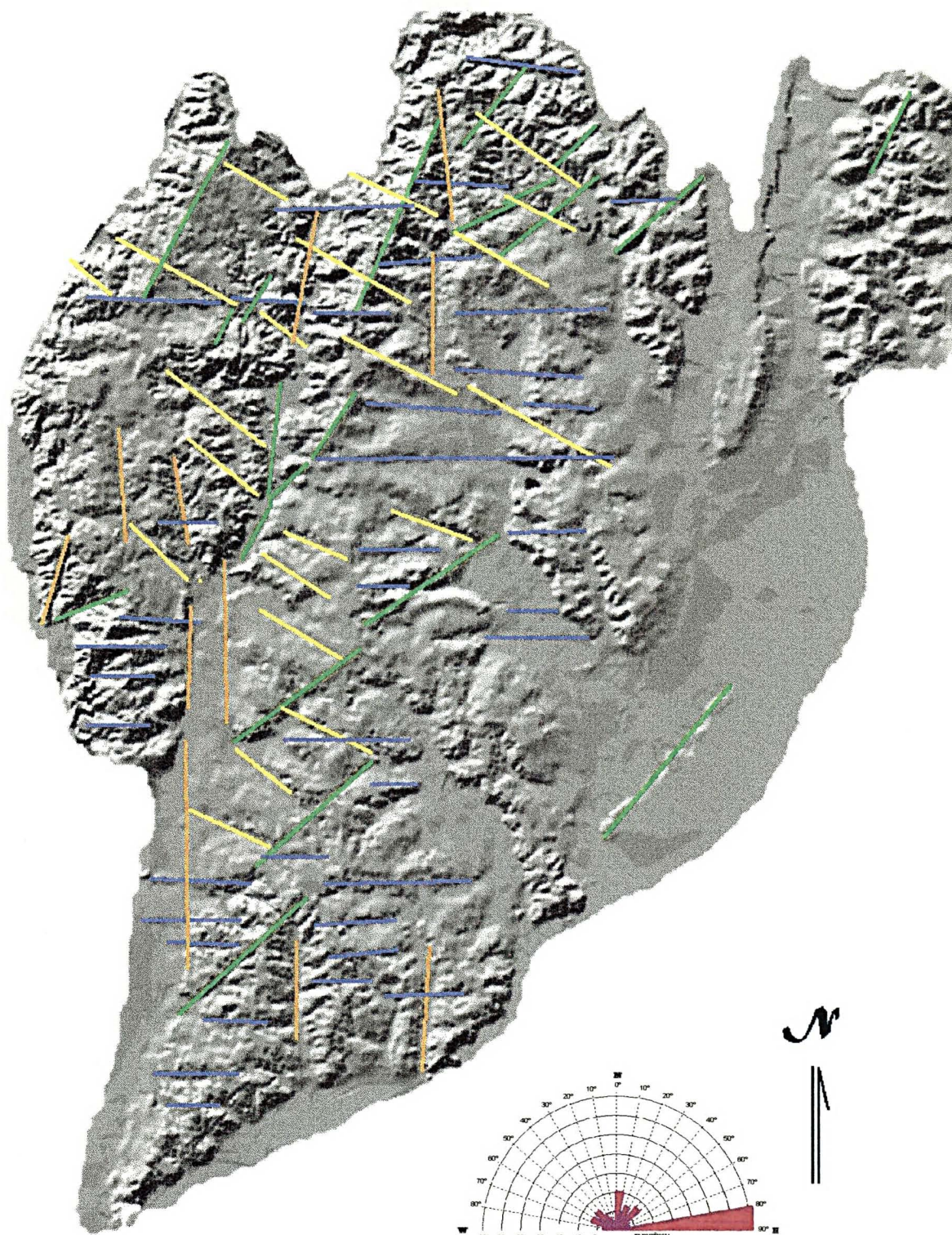


Figura 30 - Traços estruturais sobre modelo digital de terreno. Iluminação no azimute 330°. Tonalidades de traços diferentes, marcam direções definidas: amarelo, quadrante NW; alaranjado, direção \cong NS; verde, quadrante NE; azul, direção E-W.

7.3 SUPERFÍCIE DO EMBASAMENTO DA BACIA DE CURITIBA

7.3.1 ANÁLISE DOS DADOS DOS POÇOS TUBULARES

Os dados de altimetria do contato do Embasamento Cristalino com a Bacia de Curitiba, medidos tanto em poços tubulares profundos como em afloramentos, foram interpolados para visualização do formato desta descontinuidade, a qual é uma via preferencial para trânsito da água subterrânea.

Aos registros de poços tubulares, georeferenciados, aplicou-se o método geoestatístico para determinar o comportamento espacial da variável e realizar estimativas de valores em pontos não amostrados. Através desta sistemática, foi gerado um mapa de zoneamento da variável.

A distribuição de frequências determinou que a população observa comportamento aproximadamente gaussiano (figura 31).

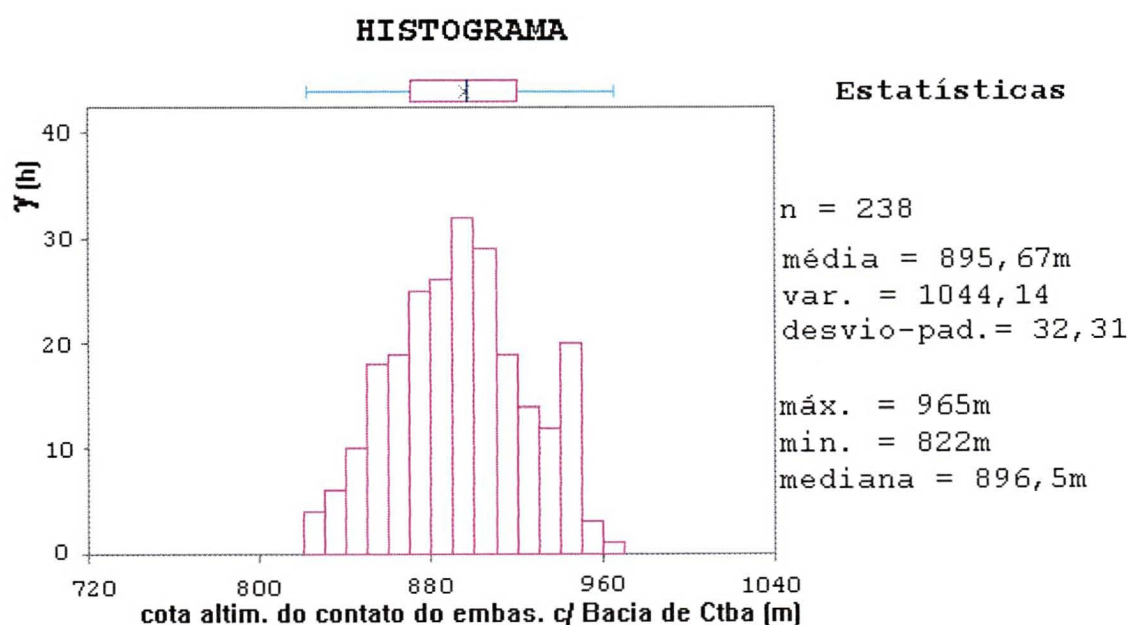


Figura 31 - Histograma de frequência para dados de cotas altimétricas do contato dos sedimentos da Bacia de Curitiba com o Embasamento Cristalino (*software* GEO-EASTM).

A variografia sobre os dados coletados, revelou efeito deriva, já esperado por se tratar de área de bacia sedimentar (figura 32).

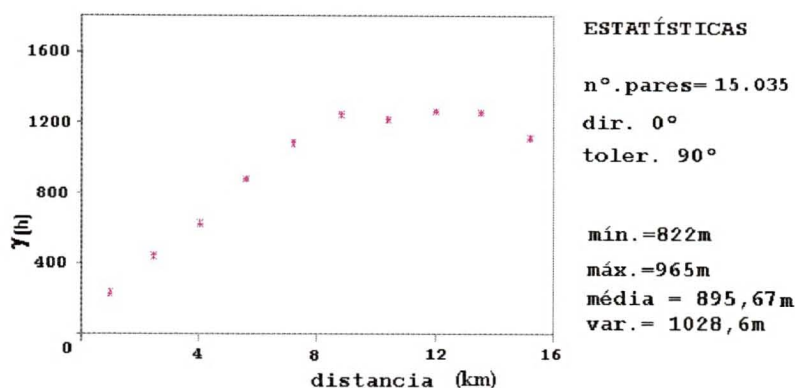


Figura 32 - Variograma total para dados altimétricos do contato entre sedimentos da Bacia de Curitiba e rochas do embasamento da bacia (*software* GEO-EAS™).

Uma vez constatado o efeito deriva, foram realizadas operações para eliminar as tendências superimpostas. O exame dos polinômios que reproduzem a superfície com melhor ajuste ao comportamento desta variável, indicou uma equação de quarta ordem como a mais apropriada (figura 33). Com base na análise variográfica, foi adotado, para gridagem do mapa de tendências, dimensão de células quadradas, igual a 300m.

Foi gerado, então, um mapa de contorno para superfícies de tendência de 4º grau (figura 34). Aos resultados obtidos, foram somados os valores estimados pela krigagem dos resíduos. O mapa produzido pelos dados de resíduos e tendência gerou uma figura em que o produto das curvas de tendência são predominantes. Desta forma, foi adotado o mapa estimado por tendências para representar o comportamento da superfície do Embasamento Cristalino sob a Bacia de Curitiba.

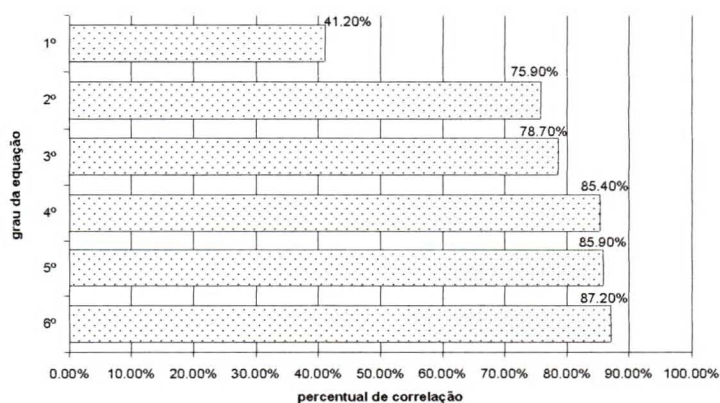


Figura 33 - Percentual de correlação entre diferentes polinômios e a superfície a ser modelada - contato entre o embasamento e sedimentos da Bacia de Curitiba.

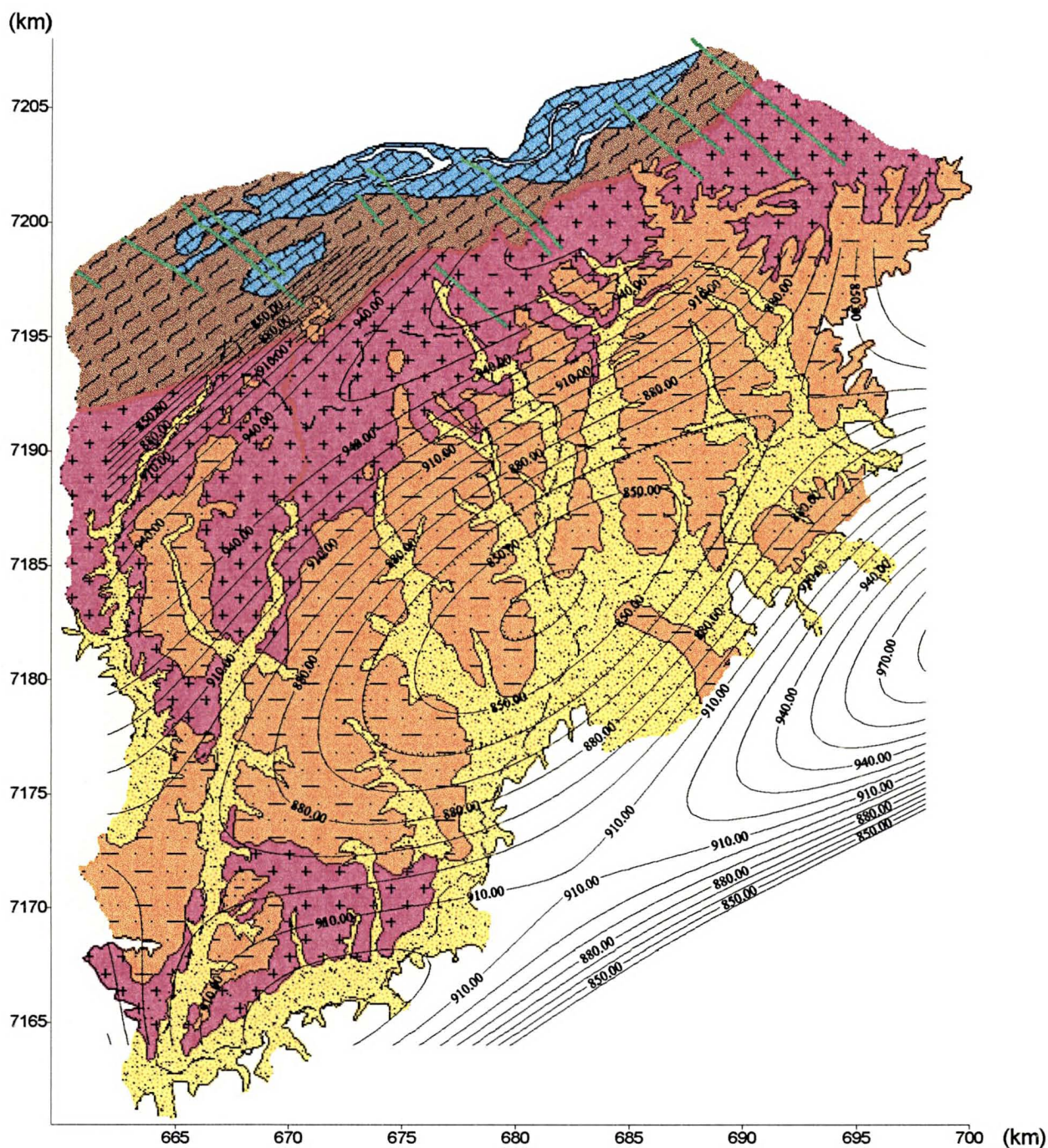


Figura 34 - Mapa de contorno indicando valores de tendências para cotas altimétricas do contato entre sedimentos da Bacia de Curitiba e rochas do Embasamento Cristalino (legenda do mapa geológico na figura 11). As curvas foram obtidas a partir de um polinômio de 4º ordem, com 85,4% de correlação. As curvas estão sobrepostas ao mapa geológico da área pesquisada (coordenadas em UTM). É notável a direção N50E do eixo da bacia.

7.4 GRAVIMETRIA

A superfície que limita o topo do Embasamento Cristalino e os sedimentos da Bacia de Curitiba, representa uma rota de fluxo para as águas subterrâneas. Determinar esta superfície, significa reconhecer aspectos do próprio fluxo e por conseguinte dos aquíferos, tanto da bacia como do embasamento. Por outro lado, a configuração do topo do embasamento, deve revelar aspectos da evolução tectônica da área, cuja atuação parece controlar os aquíferos em estudo.

Os dados de anomalia Bouguer, revelaram a partir do histograma de frequência (figura 35), distribuição espacial aproximadamente normal.

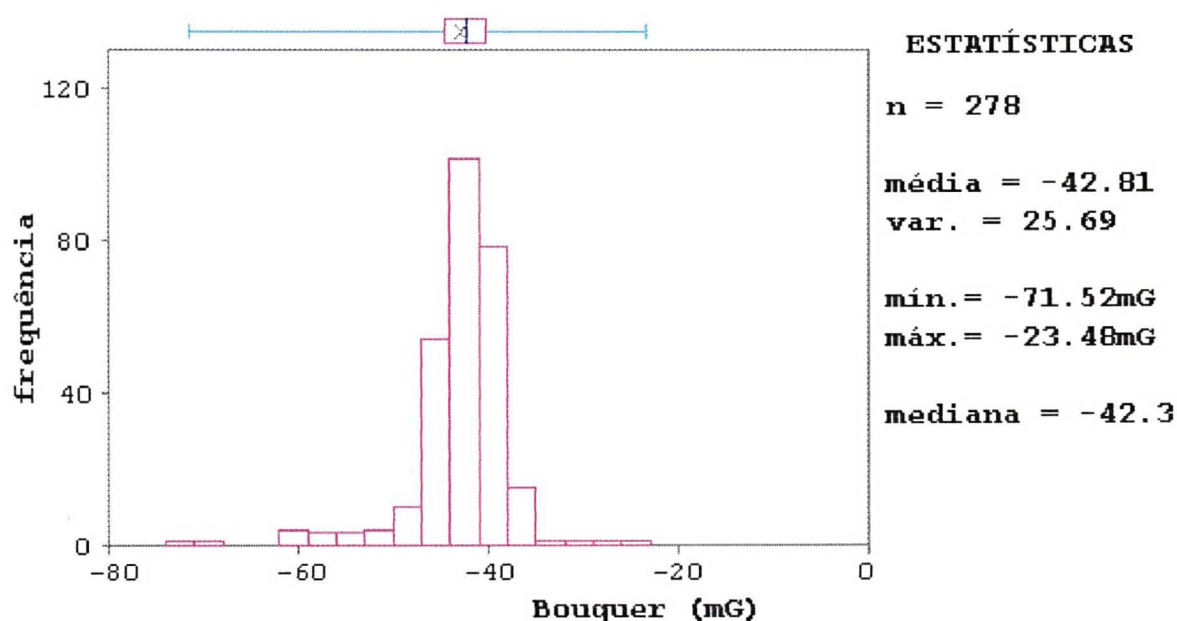


Figura 35 - Histograma de frequência para dados de anomalia Bouguer (*software* GEO-EAS™).

A ocorrência de subpopulações é aparentemente incipiente, mas no gráfico de frequência acumulada este aspecto é ressaltado (figura 36).

Para trabalhar com dados de uma única população, o número de amostras foi reduzido, estabelecendo-se o limite de -50 a -38mG. Entretanto, a estratégia não surtiu o resultado esperado. Desta vez, a distribuição dos dados em subpopulações já é evidente no histograma (figura 37).

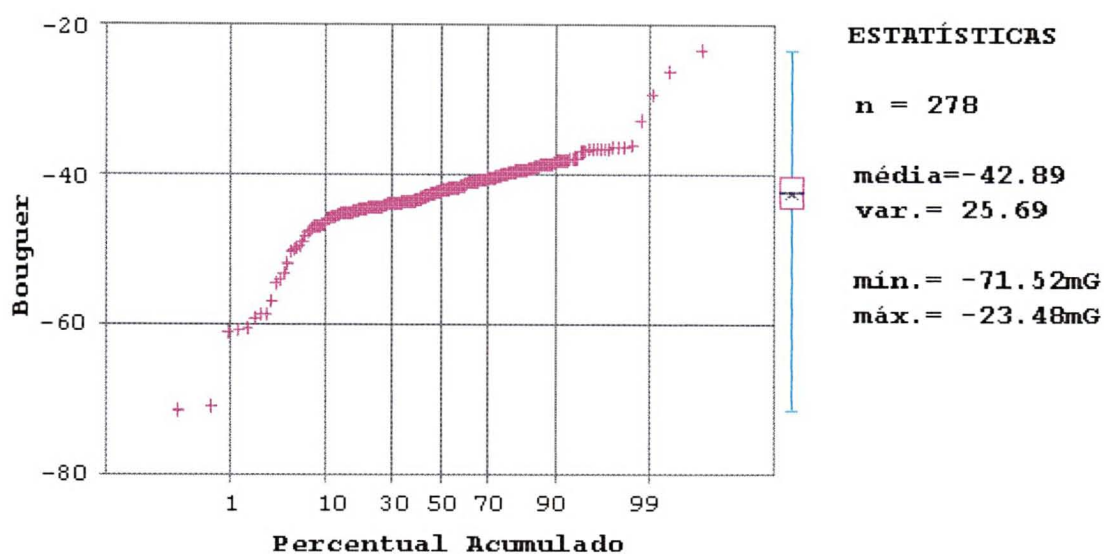


Figura 36 - Diagrama de frequência acumulada para dados de anomalia Bouguer (*software* GEO-EASTM). Observa-se a manifestação de subpopulações na distribuição das amostras.

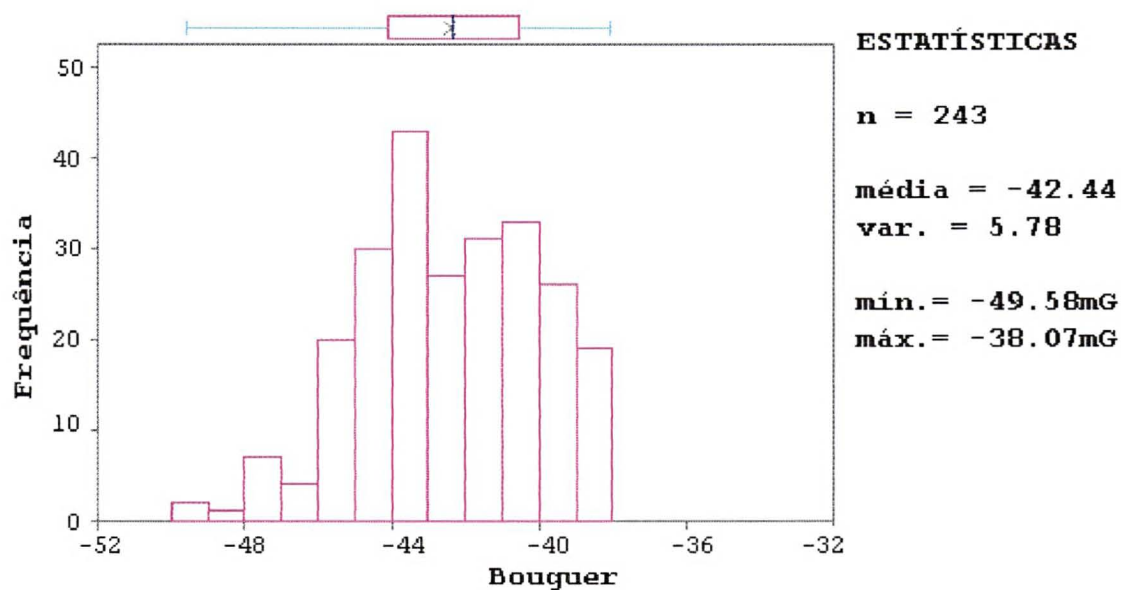


Figura 37 - Histograma de frequência realizado com número de dados reduzidos, para eliminar efeitos de subpopulação, o que não foi obtido para estes limites (*software* GEO-EASTM).

O gráfico de frequência acumulada também mostra que, para estes limites, a ocorrência de subpopulações ainda persiste (figura 38), apesar de mostrar-se menos visível.

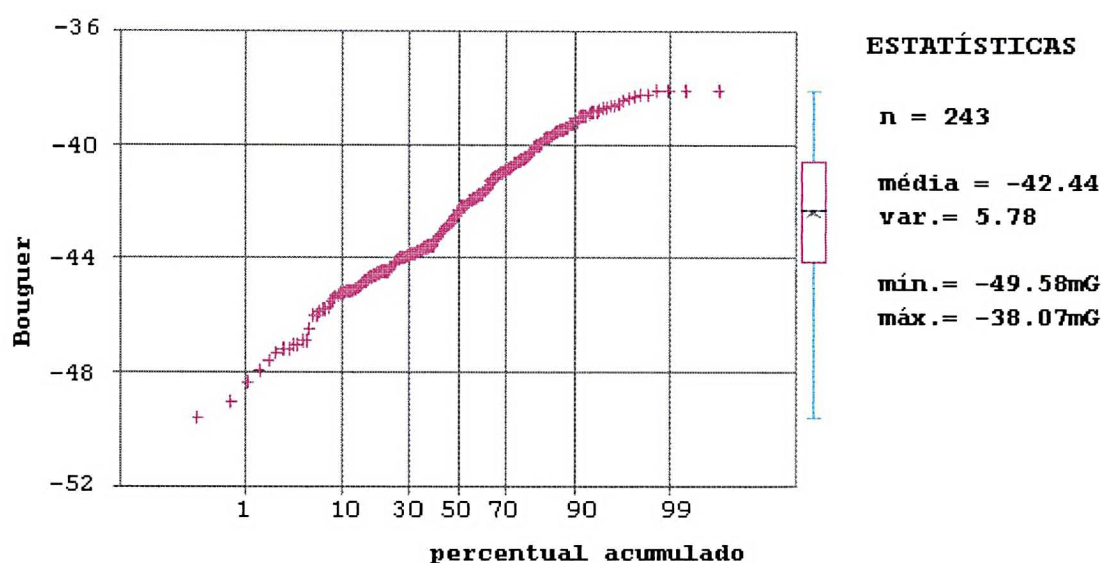


Figura 38 - Diagrama de frequência acumulada para dados de anomalia Bouguer, reduzidos para eliminar efeitos de subpopulação (*software* GEO-EAS™).

Novas tentativas de redução dos limites da amostragem, para isolar classes da população onde, em conjunto, reconheça-se comportamento estatisticamente equacionável, resultaram em insucesso. O fenômeno da superposição de diferentes populações é uma característica dos dados.

O variograma geral para os dados da anomalia Bouguer, para amostras reduzidas ao limite entre -50,00 mG e -38,00 mG, apresentaram forte efeito deriva (figura 39).

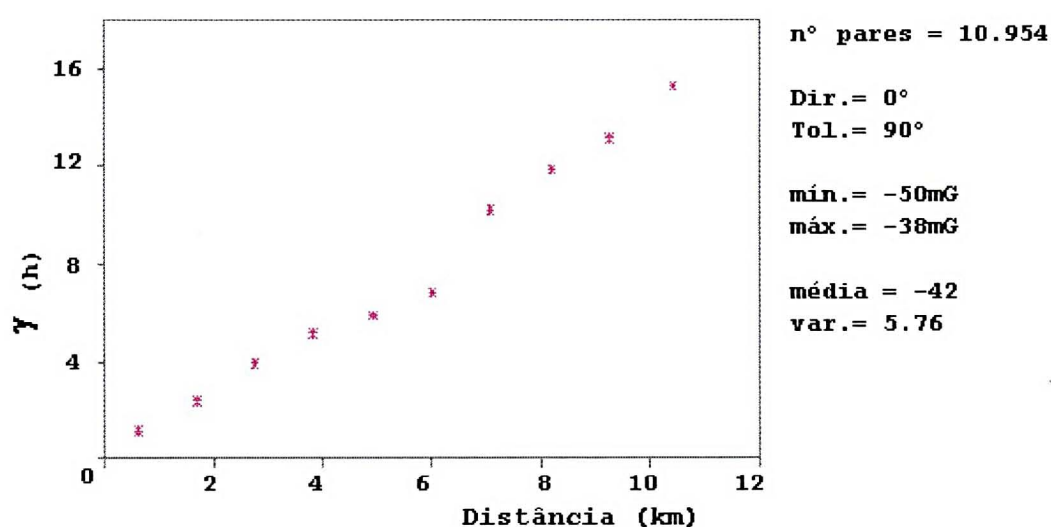


Figura 39 - Variograma para dados de anomalia Bouguer, omnidirecional (*software* GEO-EAS™).

Para eliminar os efeitos de tendência imposta pelo comportamento do substrato da Bacia de Curitiba, foi realizada a análise de superfícies de tendência.

Um polinômio de 3º grau foi aquele que melhor ganho apresentou na reprodução da superfície dos dados de anomalia Bouguer (figura 40).

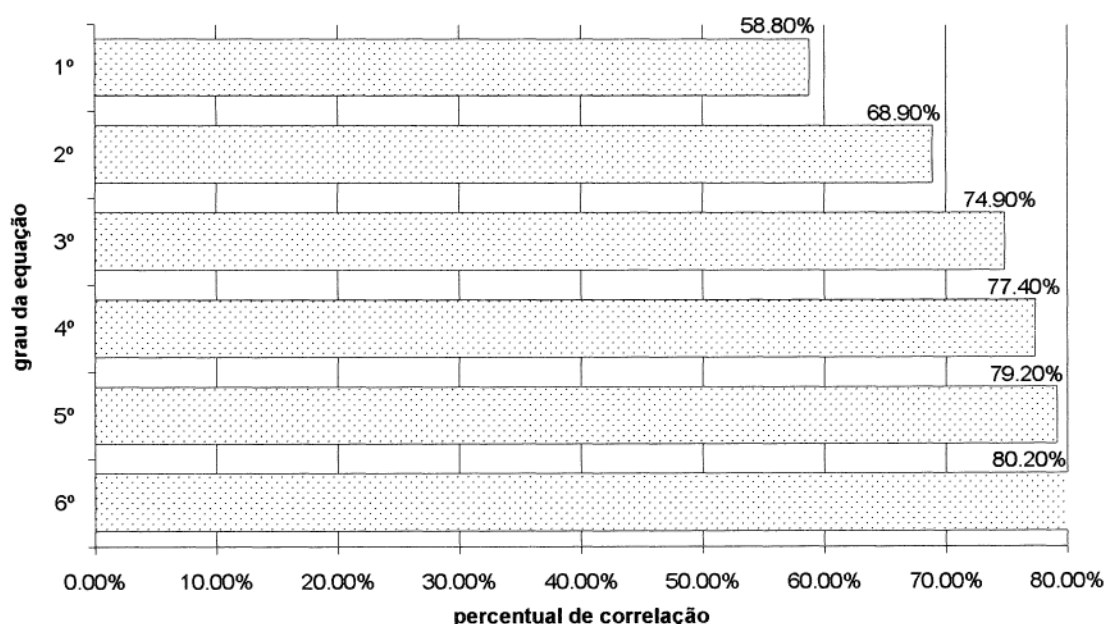


Figura 40 - Correlações de ajuste entre polinômios e a superfície gravimétrica.

O mapa, resultante de tendências de valores estimados para uma superfície de 3º grau, apresenta concordância razoável com a disposição da Bacia de Curitiba (figura 41).

Os resíduos, obtidos pela aplicação deste polinômio, apresentam distribuição de frequência aproximadamente normal (figura 42).

Apesar da adequação do polinômio empregado, a variografia sobre os resíduos obtidos mostraram que o efeito deriva continuava destacado (figura 43).

Outras tentativas foram realizadas com polinômios de ordens variadas, registrando-se, no entanto, para todos, a persistência do fenômeno (figura 44).

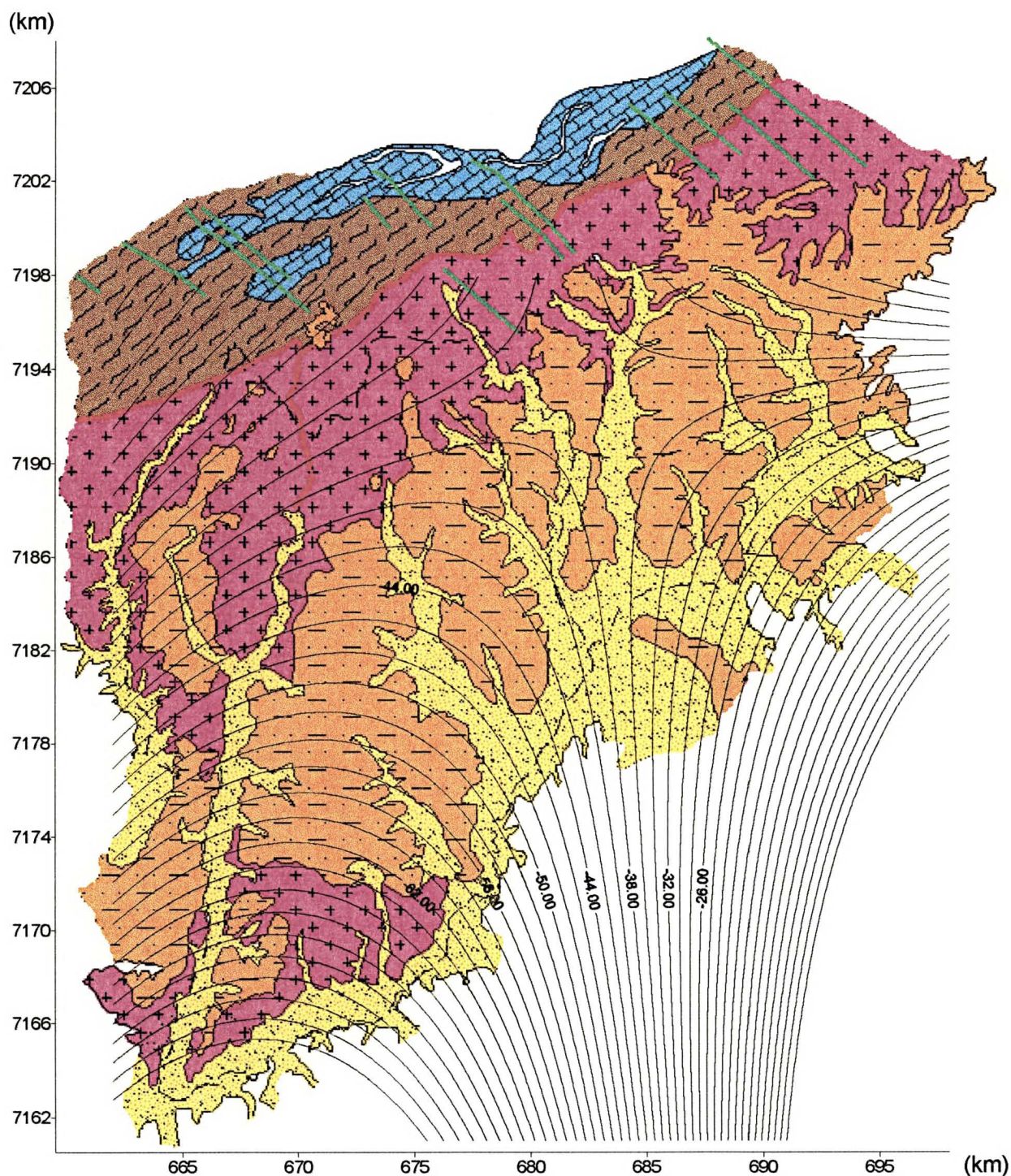


Figura 41 - Curvas de valores estimados de tendência (em mG), a partir de um polinômio de 3º ordem, para anomalia Bouguer. As curvas estão superpostas ao mapa geológico da área (ver legendas na figura 11). Coordenadas em UTM.

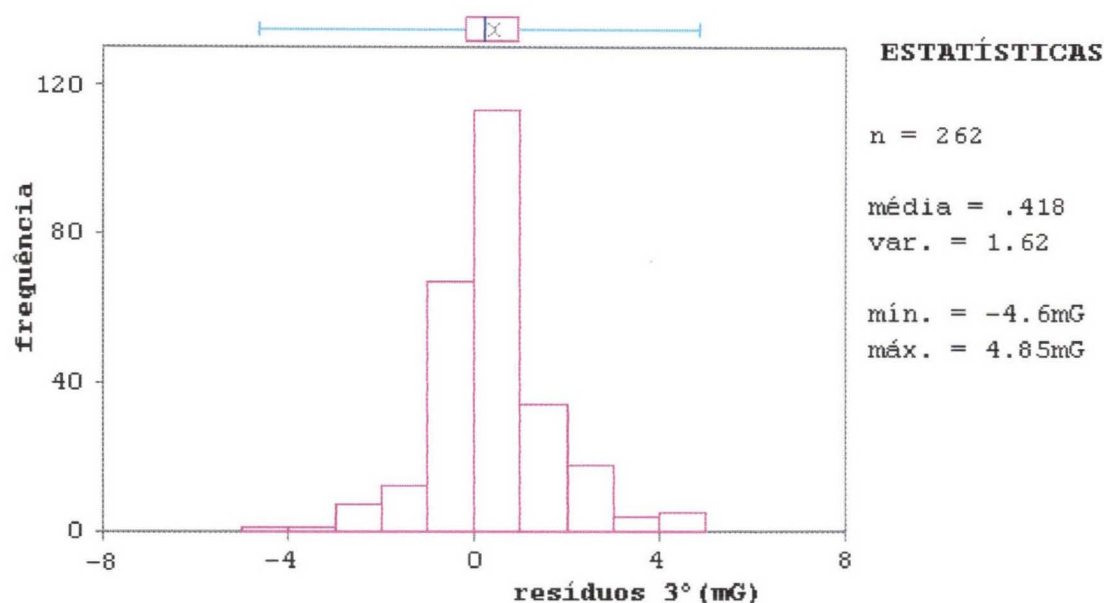


Figura 42 - Histograma de frequência para dados de resíduos de anomalia Bouguer, limitado a um certo intervalo de medidas para impedir o aparecimento de subpopulações, obtido pela aplicação de um polinômio de 3º grau (*software* GEO-EAS™).

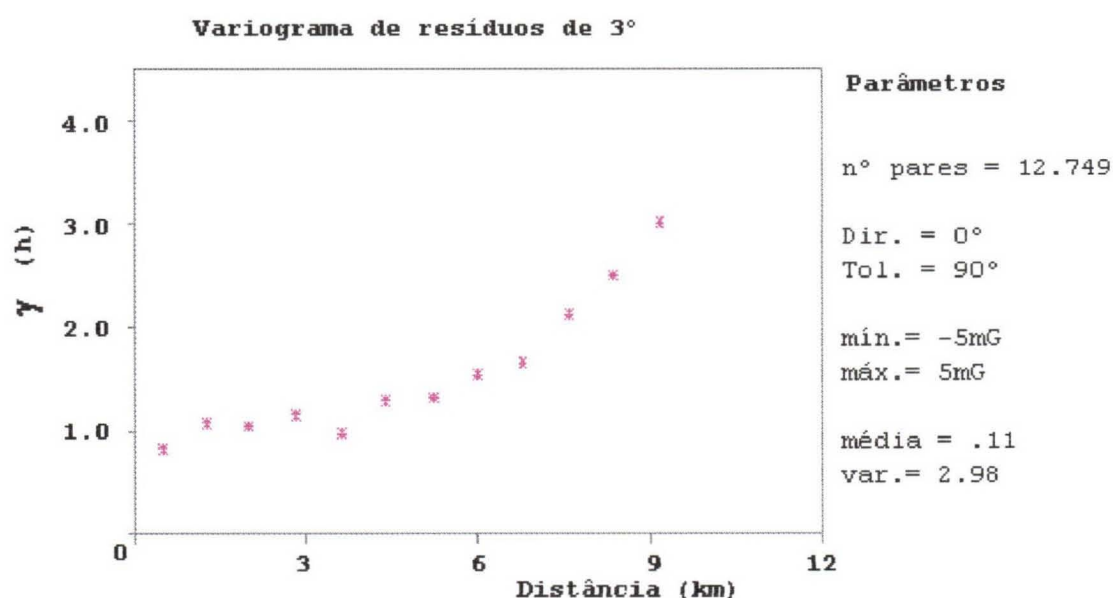


Figura 43 - Variograma para resíduos de 3º de anomalia Bouguer, com ângulo de abertura total (*software* GEO-EAS™).

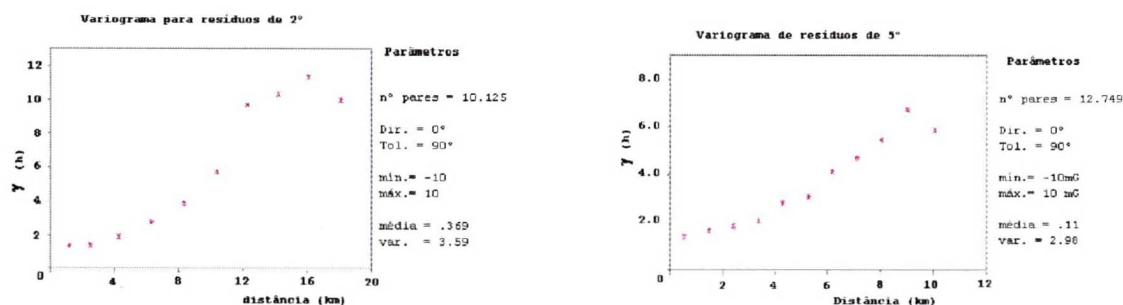


Figura 44 - Variogramas para resíduos de 2ª e 5ª ordem, de anomalia Bouguer, com ângulo de abertura total (*software* GEO-EAS™).

Um fator que interfere na normalização dos resultados é a grande irregularidade da malha amostral. As estações de medição obedecem a uma disposição extremamente caótica ao longo de uma área bastante extensa (figura 45). Apesar do número de estações ser superior a duas centenas, estas se concentram especialmente na área do centro politécnico e ao longo das principais vias de acesso a Curitiba.

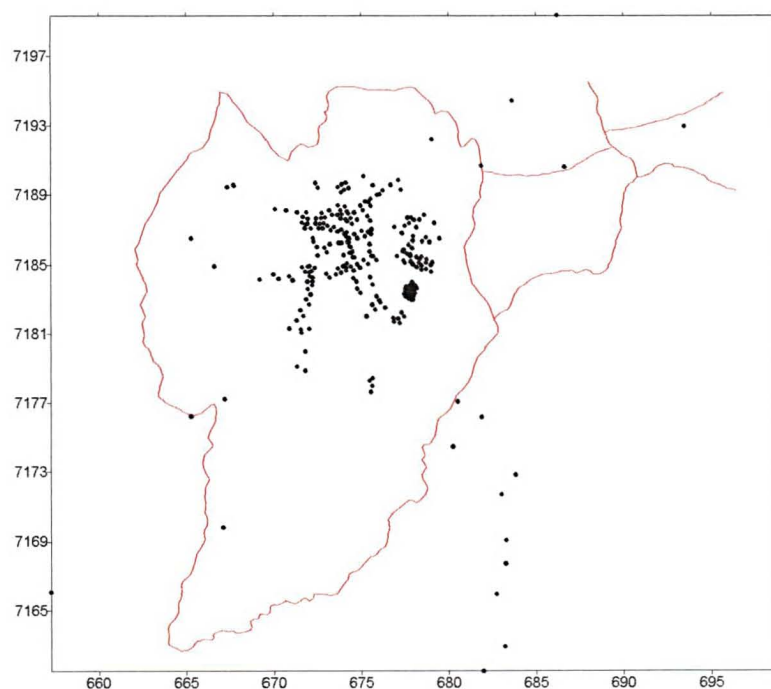


Figura 45 - Localização das estações gravimétricas. O contorno em vermelho representa a área dos aquíferos em estudo. Observa-se o município de Curitiba, Pinhais e parte de municípios vizinhos (*softwares* SURFER 6.0™ e AUTOCAD v.12™).

A irregularidade da malha gera, por um lado, um grande número de células onde o valor estimado, apresenta grande incerteza nos resultados. Por outro lado, operações de variografia em regiões onde a concentração de pontos é muito acentuada, gera distorções, especialmente quanto a variação de valores, para realizações muito próximas.

Para reduzir o problema advindo da malha amostral, foi realizada a operação de *decluster* (desagrupamento), que se traduz na estratégia de atribuir pesos a cada realização e promover a eliminação de pontos cuja importância, em função das vizinhanças, seja negligenciável. Esta operação foi realizada com o concurso do *software* “GS-LIB™”.

Aliado à operação de *decluster*, de redução de pontos em áreas densamente amostradas, a região amostrada também foi reduzida, minimizando o número de vazios.

A nova área, significativamente menor, apresenta agora uma concentração, algo mais homogênea dos pontos (figura 46).

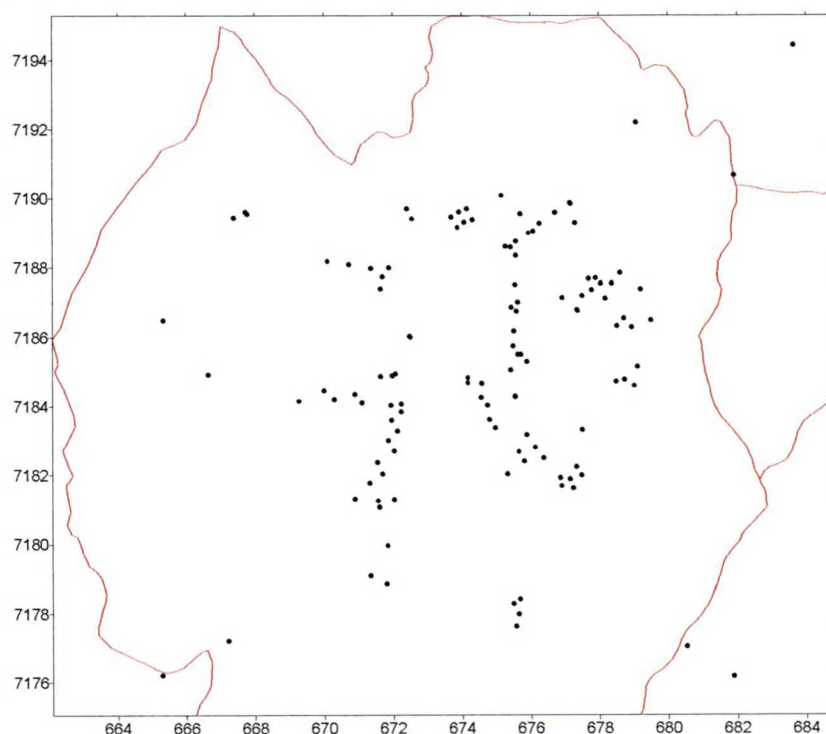


Figura 46 - Nova disposição dos pontos, onde foram realizadas medições das anomalias gravimétricas, após a realização de *decluster* e redução da área de amostras. O contorno em vermelho representa parte da área dos aquíferos em estudo. (*softwares* SURFER 6.0™ e AUTOCAD 12™).

Os dados reduzidos, quando examinado o comportamento da distribuição em classes amostrais, revelaram a presença de mais de uma subpopulação inserida ao conjunto. Mesmo limitando os dados existentes ao exame de uma faixa da população, ainda persistia a presença de subdivisões no conjunto (figura 47).

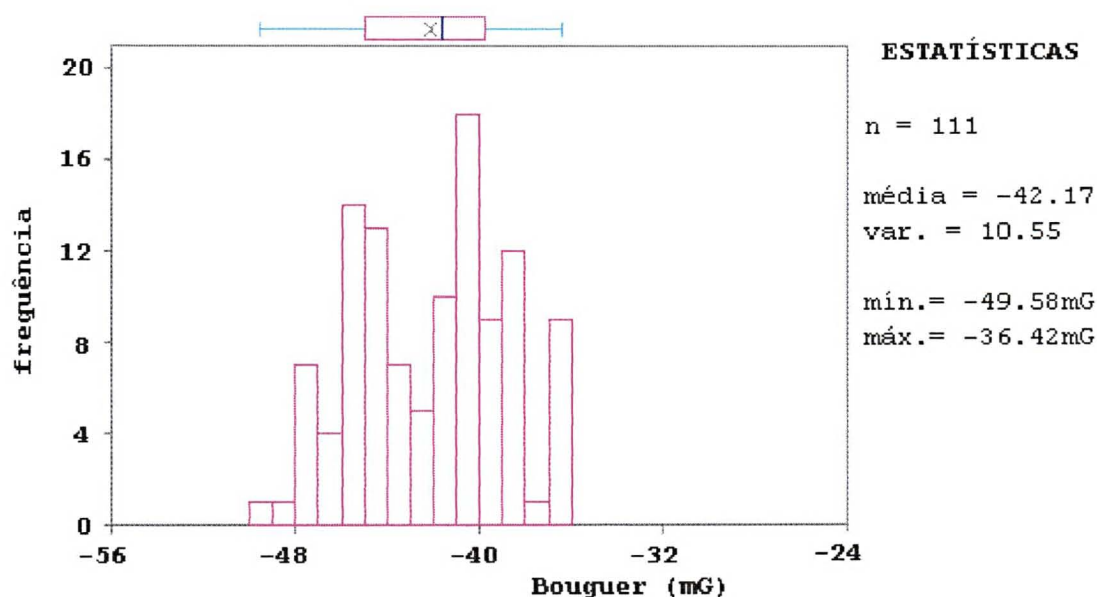


Figura 47 - Histograma de frequência para dados de anomalia Bouguer. A população foi limitada ao intervalo de valores entre -50 a -38mG, para impedir o aparecimento de subpopulações. Estratégia que não surtiu efeito (software GEO-EAS™).

Este comportamento da variável dificulta sobremaneira operações estatísticas, pois o adequado tratamento depende de características amostrais.

Adicionado ao problema das frequências de classes, a variografia destas realizações mostra que o efeito deriva permanece bastante expressivo (figura 48).

Para contornar este problema, foi promovido, novamente, redução dos dados e da área de abrangência dos pontos amostrados. Restringindo-se de 123 para 70 dados (figura 49).

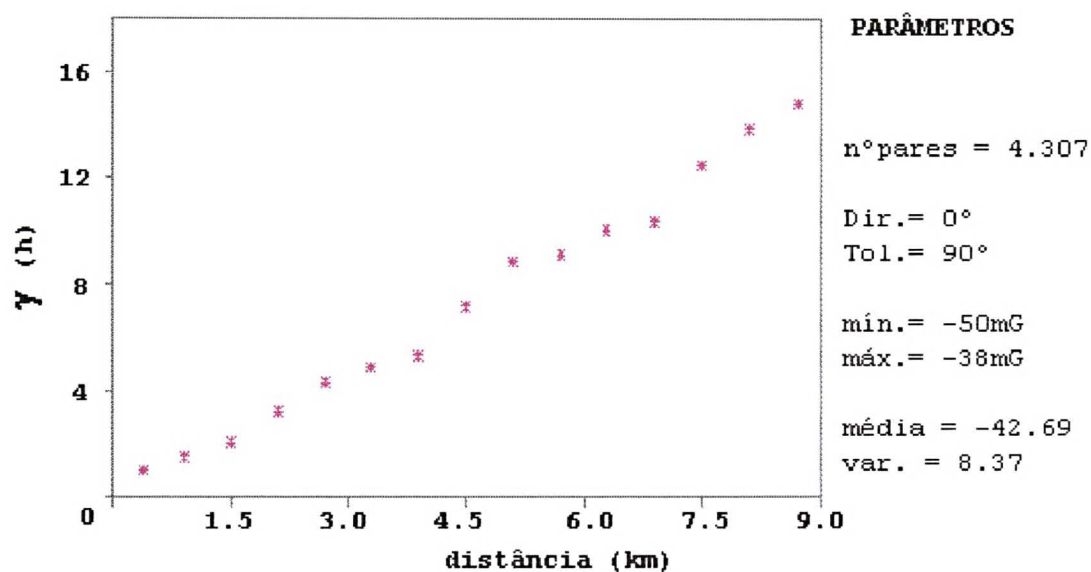


Figura 48 - Variograma para dados de anomalia Bouguer, com ângulo de abertura total. O número de amostras trabalhadas soma 123 resultados (*software* GEO-EASTM).

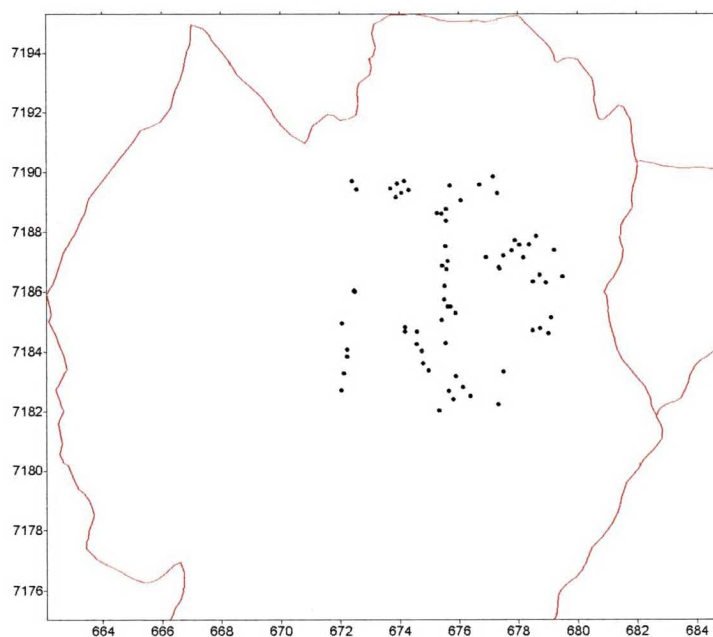


Figura 49 - Pontos de medições de anomalias gravimétricas, após a restrição da área total amostrada por efeitos da superposição de populações. O contorno em vermelho representa parte da área dos aquíferos em estudo. (*softwares* SURFER 6.0TM e AUTOCAD 12TM).

Esta nova subdivisão dos dados resultou em uma população que ainda apresenta indícios da presença de subpopulações, mas de maneira suficientemente atenuada para considerá-la com perfil grosseiramente normal (figura 50).

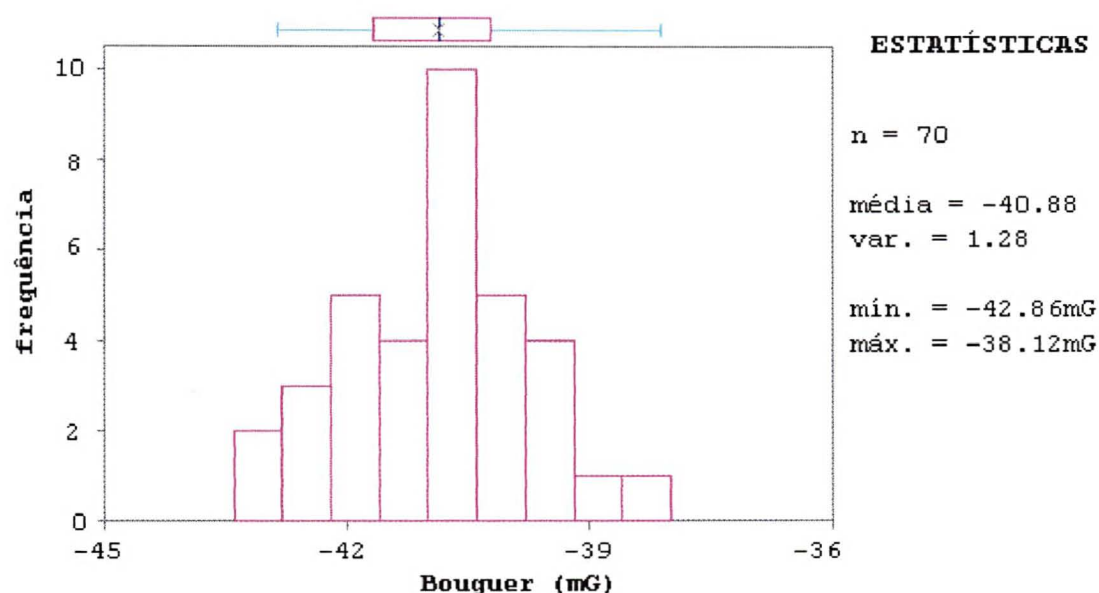


Figura 50 - Histograma de frequência para dados de anomalia Bouguer. População obtida após diversas eliminações de áreas amostradas (*software* GEO-EAS™).

A variografia desta população revela a incidência de forte efeito deriva (figura 51).

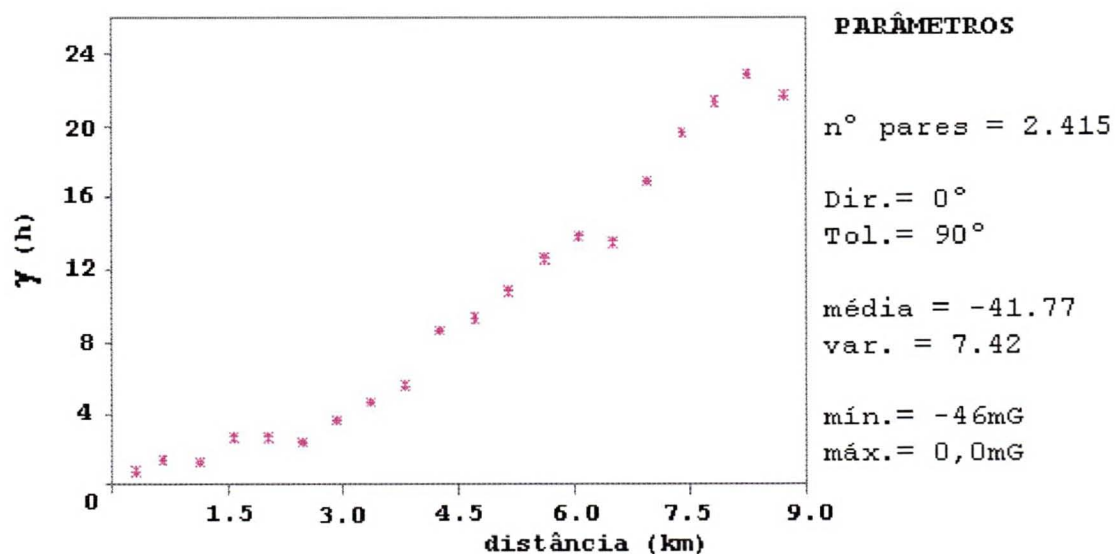


Figura 51 - Variograma para dados de anomalia Bouguer, com ângulo de abertura total (*software* GEO-EAS™).

Sobre estes dados, foram promovidas operações para retirada de tendências. Um polinômio de 2º ordem foi o que melhor reproduziu a superfície examinada (figura 52).

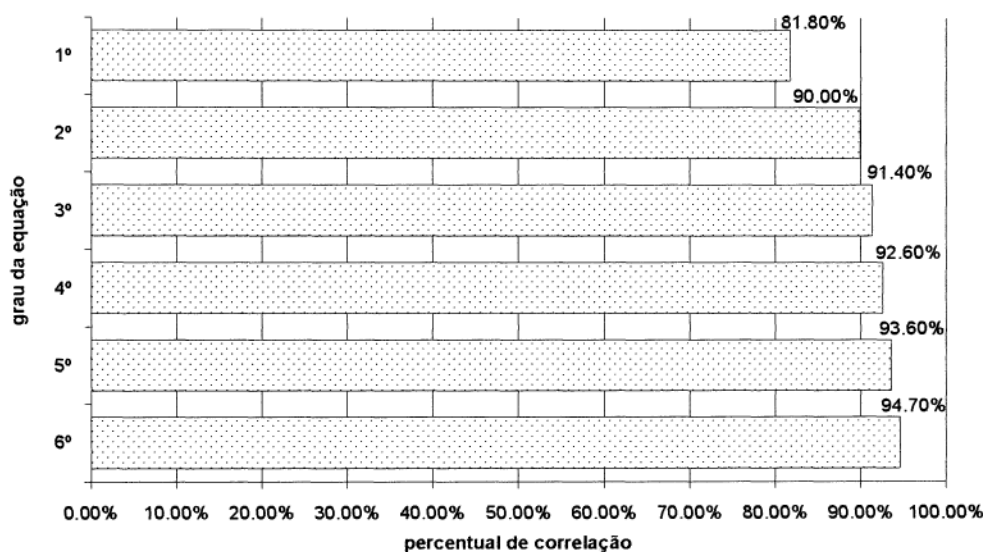


Figura 52 - Percentuais de correlação entre dados de anomalia gravimétrica Bouguer e polinômios de ajuste.

O variograma dos resíduos, produzidos pela operação de retirada de tendências (figura 53), apresenta ainda evidências de tendências superimpostas, bem como da incidência de efeito buraco. Na verdade, conforme se observa nas percentagens de correlação entre polinômios e variável, a tendência a ser retirada pode ser alcançada com a aplicação de uma equação de ordem reduzida. O emprego de polinômios, com grau superior a segunda ordem, já pode ser suficiente para inserir tendências artificiais. Desta forma, optou-se por aplicar um polinômio de primeira ordem para remover os efeitos de tendência aos dados gravimétricos.

Também, para resíduos de primeira ordem, reconhece-se a incidência do efeito buraco em ciclos definidos (figura 53).

A análise variográfica dos valores de resíduos revelou um comportamento anisotrópico da variável. Os variogramas que apresentam máxima e mínima distância de continuidade apontam para as direções N30E e N60W (figura 55). Estas, balizam a anisotropia e determinam a configuração espacial da variável, demonstrada pelo elipsóide estrutural (figura 54).

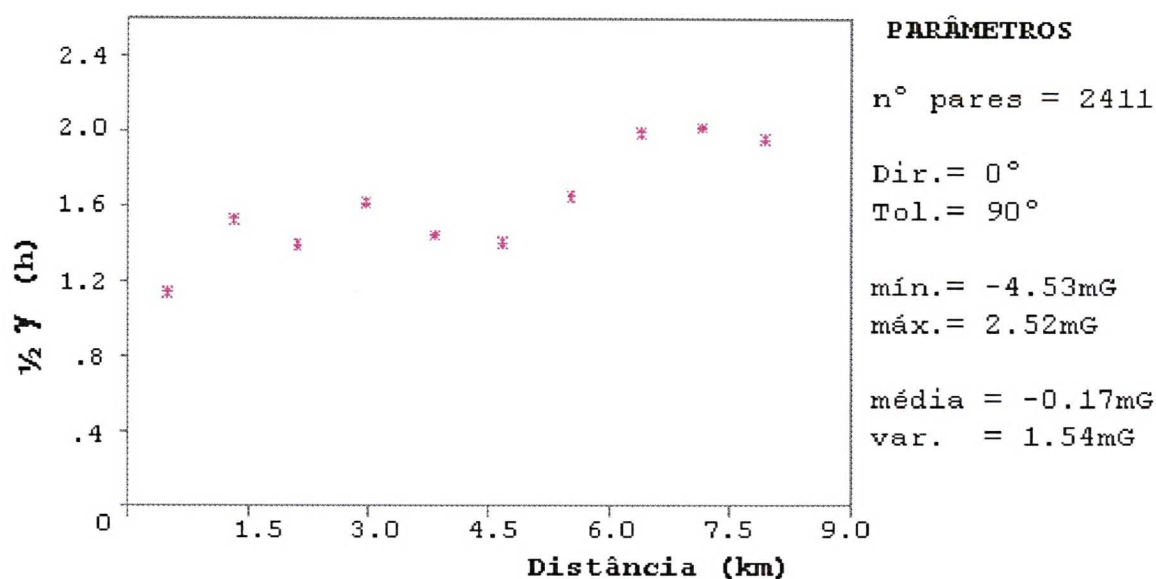


Figura 53 - Variograma para dados de resíduos de 1º ordem de anomalia Bouguer, com ângulo de abertura total (*software* GEO-EAS™).

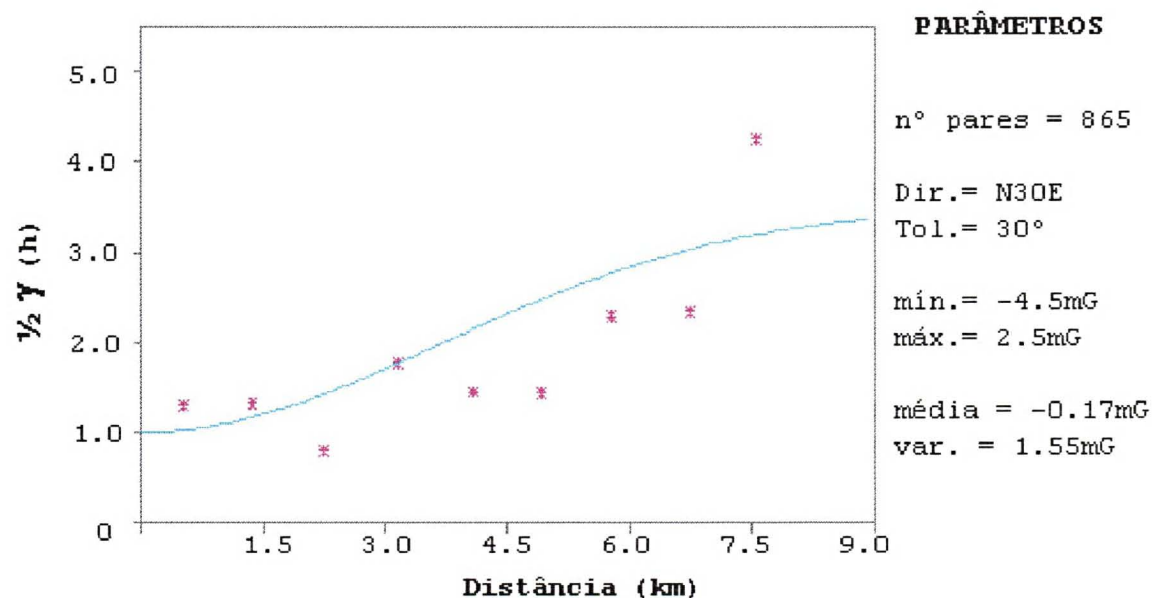


Figura 54 - Variograma para dados de resíduos de 1º ordem de anomalia Bouguer. Eixo principal do elipsóide. Os dados se ajustam a um modelo "Gaussiano", com patamar igual a 2.5, alcance de 9,0km e efeito pepita de 1.0 (*software* GEO-EAS™).

A varredura, realizada através do variograma, mostra que em todas as direções existe a manifestação do “efeito buraco”. Este fenômeno apresenta-se de forma cíclica e é uma característica da variável (figura 55).

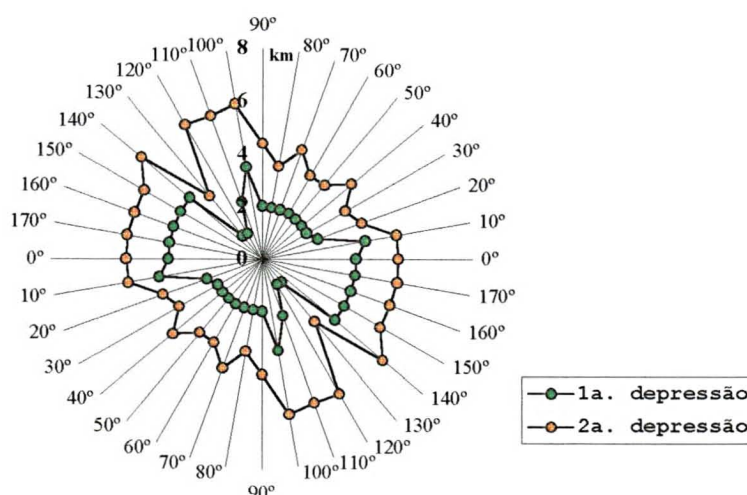


Figura 55 - Registro de pulsos do “efeito buraco”, detectado em varredura através de variogramas, sobre dados de resíduos de 1º grau de anomalia Bouguer. A primeira ocorrência é aquela que surge, mais próxima da origem do gráfico. O norte do gráfico está representado pela linha 90°.

A incidência do “efeito buraco” mostra pequenos pulsos, registrados a cada 800m, que se somam em um grande pulso, em torno de 6,0km. Entretanto, mesmo no menor pulso de onda, observam-se sucessões menores, quando a escala de observação é aumentada. De uma maneira geral, na direção N30E, que é a direção de maior continuidade, tem-se a repetição de uma estrutura a cada 1,6km. Na direção perpendicularmente oposta, N60W, tem-se a repetição a cada 800m. Na medida em que se afasta do primeiro registro dos pulsos, a cada nova incidência, observa-se a soma de cada efeito anterior sobre o próximo, fazendo com que no gráfico, cada novo ponto do “efeito buraco”, apresente-se cada vez mais evidente.

Após a determinação dos parâmetros de anisotropia da variável, através da análise estrutural, foi realizada a krigagem dos resíduos de anomalia Bouguer. Para tanto, foram adotadas células quadradas com dimensão de 200m, modelo gaussiano, patamar de 2.5, ângulo de 30°, alcance do eixo maior de 9,0km e do eixo menor com 4,5km.

Em seguida, os valores de resíduos estimados por krigagem ordinária, foram somados àqueles de tendência de 1º grau, obtidos por análise de tendência. Resultando então, no mapa de contorno de anomalia Bouguer (figura 56), limitado a um número de amostras e de área possíveis de serem modelados por geoestatística.

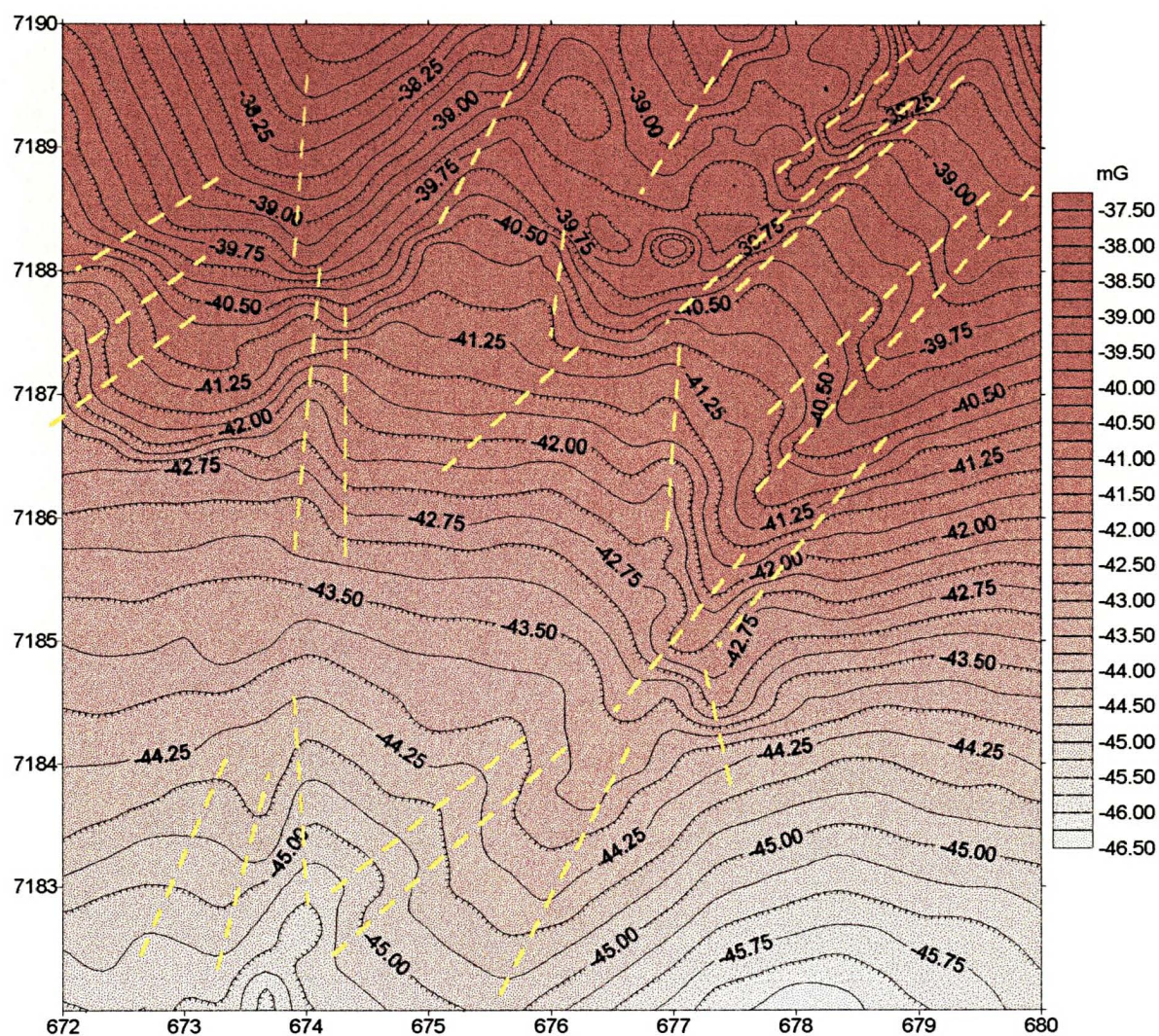


Figura 56 - Curvas de contorno de anomalia Bouguer, sobre as quais foi realizada interpretação estrutural. Os traços segmentados representam, prováveis descontinuidades geológicas.

7.5 VARIABILIDADE ESPACIAL DAS VAZÕES

Os dados de vazões de poços tubulares estão apresentados em m^3/h , ao contrário do convencional, em m^3/s , para simplificação na apresentação dos resultados, pois os aquíferos da área apresentam vazões máximas de $0,028 \text{ m}^3/\text{s}$, e o emprego desta unidade geraria valores significativos na terceira casa decimal.

Foram considerados apenas dados absolutos de produção (m^3/h), não sendo possível amostrar valores de capacidade específica dos aquíferos, pois grande número de dados dos poços utilizados são registros históricos, os quais, apesar de checados, não possuem dados de rebaixamento disponíveis e seria absolutamente inviável a realização de novos testes.

Como os dados de vazões foram atualizados, pode-se considerar que estes são representativos para uma dada capacidade de produção do aquífero, já estabilizada. Por outro lado, tratando-se de rochas fraturadas, os resultados dos testes de bombeamento são aproximados, e, apesar de longos períodos de bombeamento, são insuficientes para determinar limites adequados de exploração.

A interpolação dos valores de vazão obedeceu ao método geoestatístico, anteriormente descrito. Os dados tabulados, convertidos em meio magnético, no formato ASCII, foram submetidos a rotinas disponíveis no *software* GEO-EAS (Geostatistical Environmental Assessment Software, v.1.2.1., 1988).

O histograma de frequência demonstra que a população apresenta distribuição do tipo log-normal (figura 57). Em virtude deste comportamento, nos cálculos seguintes, passou-se a trabalhar com a variável transformada em seu logaritmo natural.

Na sequência, foi realizada a análise estrutural para determinação do comportamento espacial da variável. Inicialmente, construiu-se o variograma omnidirecional, com abrangência em todos os quadrantes e tolerância máxima (figura 58).

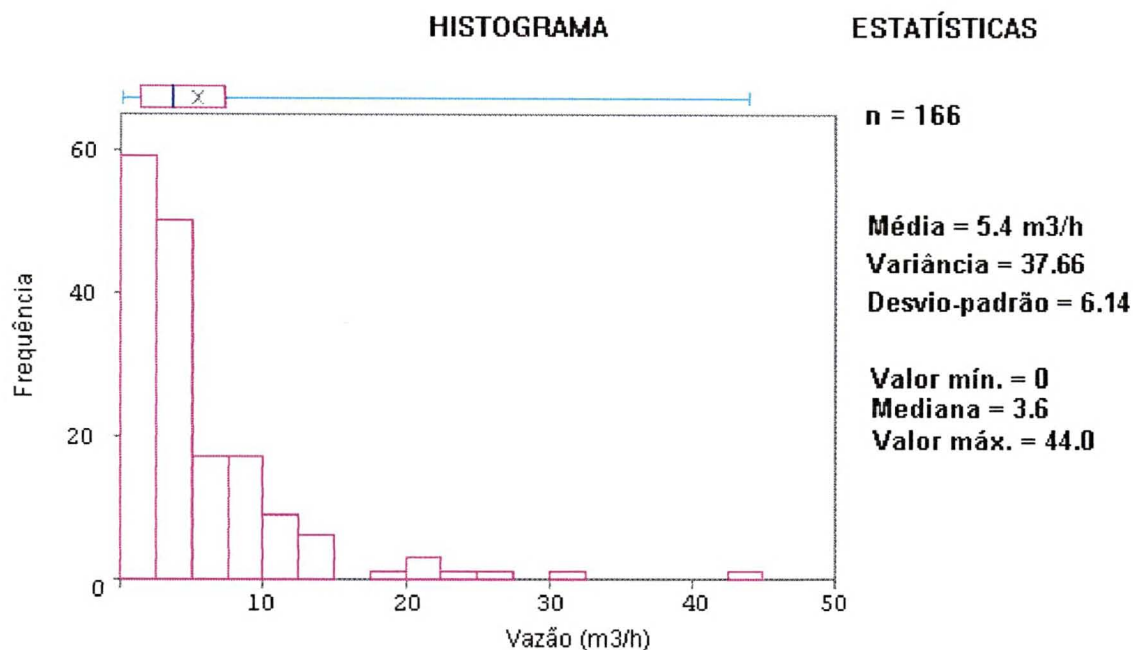


Figura 57 - Histograma de frequência para dados de vazões de poços tubulares profundos. População com distribuição assimétrica à qual foi ajustada uma distribuição do tipo “log-normal”.

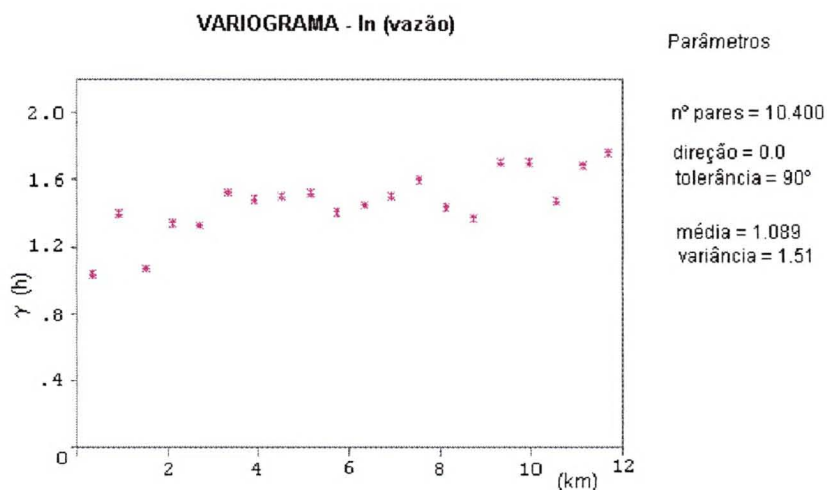


Figura 58- Variograma dos dados logaritmados de vazão, examinando todos os quadrantes e abertura máxima do ângulo de verificação (*software* GEO-EAS™).

Neste variograma observa-se a definição geral dos parâmetros estruturais:

- patamar com valor próximo de 1.5 $\gamma(h)$ para até 8,0km;

- alcance em torno de 3.0 km e
- efeito pepita entre 0.6 a 0.8 γ (h)

e ainda, um fenômeno importante: o registro de efeito buraco, o qual se repete ao longo da curva, de maneira cíclica, aproximadamente a cada 3,0km.

A análise variográfica, ao longo dos setores de 15 graus, permitiu selecionar o modelo anisotrópico para a variável. As duas direções principais do elipsóide são:

- eixo maior = N75E
- eixo menor = N25W.

Os parâmetros destas direções foram determinados pelos variogramas (figuras 59 e 60).

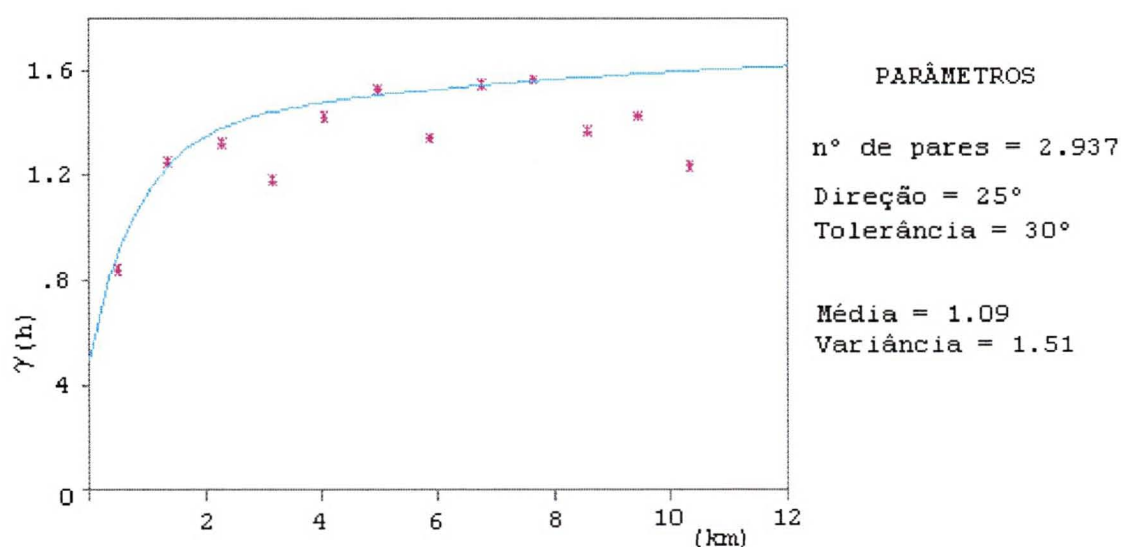


Figura 59 - Variograma do eixo maior do elipsóide, N25E. O número de pares para o primeiro e segundo pontos são 74 e 156, respectivamente (software GEO-EAS™).

O modelo conservador, definido no variograma da figura 60, apresenta, para as duas estruturas superpostas em cada direção, os seguintes parâmetros:

TABELA 5 - PARÂMETROS DO MODELO VARIOGRÁFICO, PARA O EIXO MAIOR, OBTIDOS POR VARIOGRAFIA.

Direção	Tolerância	MODELO	Efeito Pepita	Patamar	Alcance
25 (N75E)	30	exponencial	0.5	0.85	2.5
		exponencial	0.5	0.35	25.0

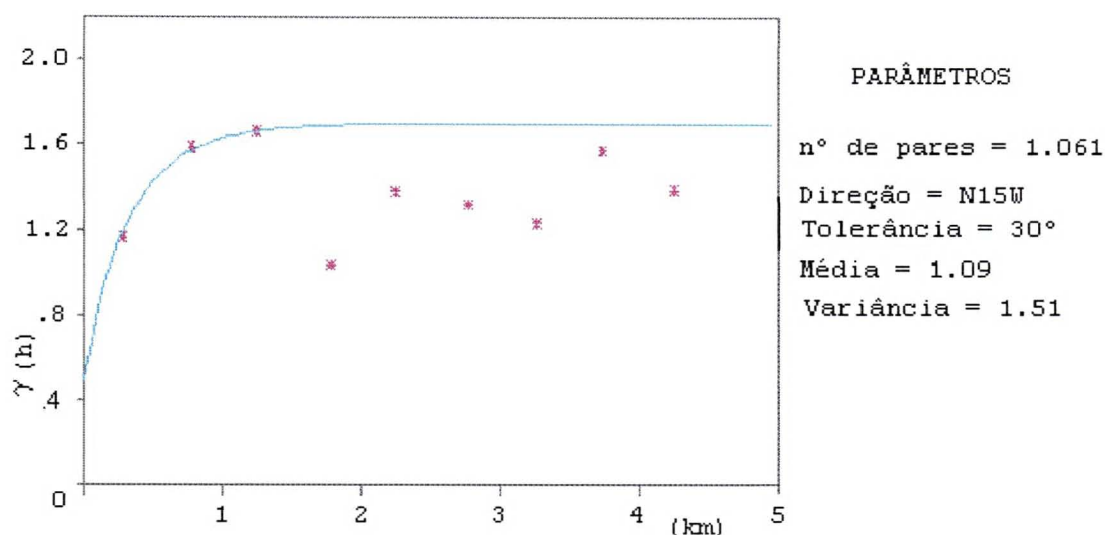


Figura 60 - Variograma do eixo menor do elipsóide, da variável “vazões”, com valores logaritmados. O primeiro ponto apresenta 47 pares e o segundo, 50 (software GEO-EAS™).

Valores do modelo do variograma do eixo menor (tabela 6):

TABELA 6 - PARÂMETROS DO MODELO VARIOGRÁFICO, PARA O EIXO MENOR, OBTIDOS POR VARIOGRAFIA.

Direção	Tolerância	MODELO	Efeito Pepita	Patamar	Alcance
125 (N25W)	30	exponencial	0.5	0.85	0.8
		exponencial	0.5	0.35	0.6

Em ambos os variogramas direcionais, observa-se o fenômeno do “efeito buraco”, já indicado no variograma geral. Na verdade, este fenômeno se repete em todas as escalas, de tal forma, que mesmo quando o valor do incremento decresce constantemente, o efeito buraco se faz presente, sempre de forma repetitiva. No eixo maior, o efeito aparece nos pares múltiplos de 3,0km, enquanto no eixo menor, o mesmo surge a cada 1,7km, sugerindo um valor médio para a

dimensão dos aquíferos, ou zona de influência dos poços, em torno de 3,0km x 1,7km, com eixo maior na direção N75E.

A partir da determinação da elipse e do modelo, foram estabelecidos os parâmetros para krigagem, que forneceu estimações de valores para pontos não amostrados, permitindo a interpolação para toda a área investigada. Este processo gerou imagens da distribuição dos valores de vazão (figura 61) e dos erros associados (figura 62).

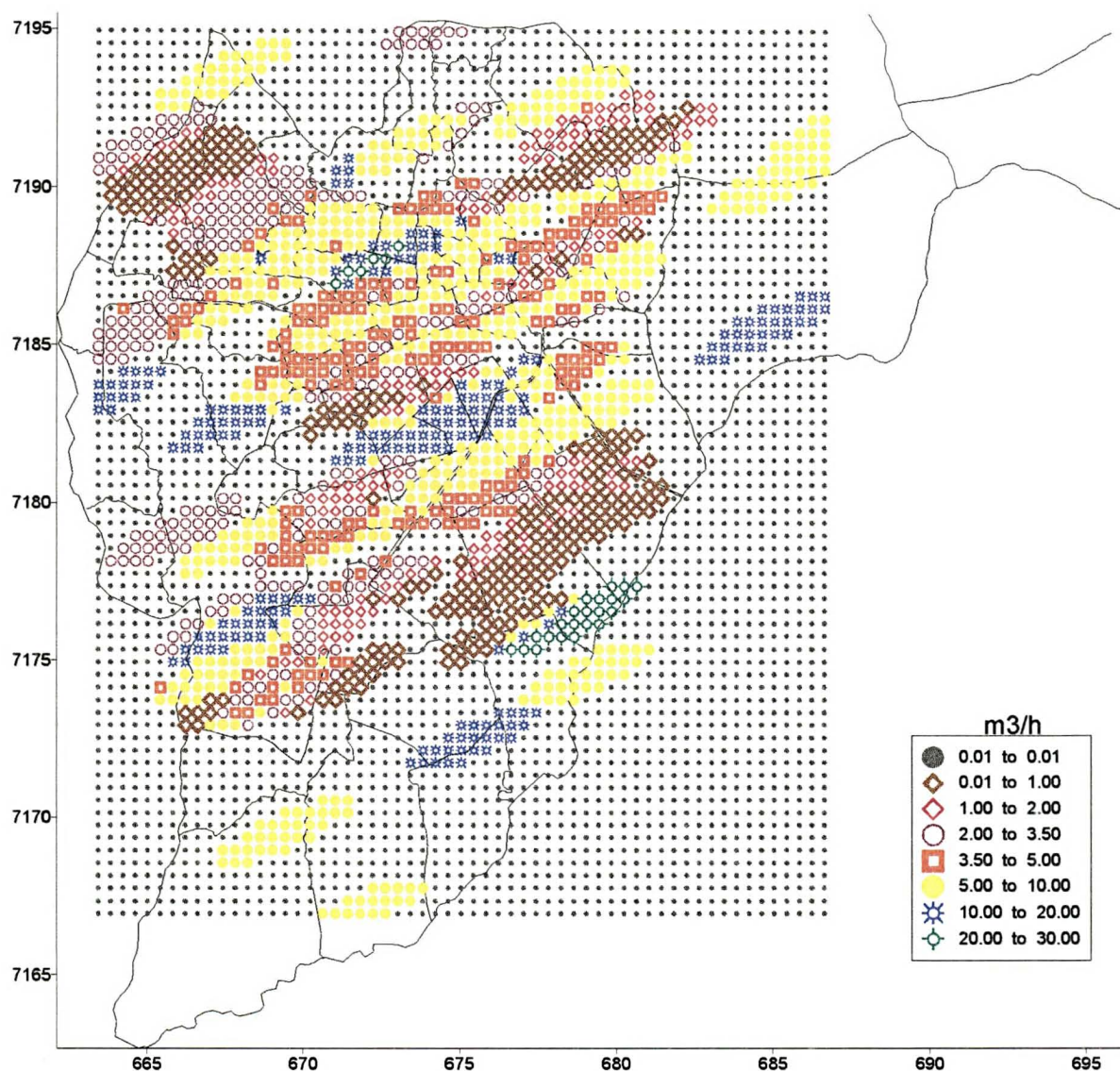


Figura 61 - Mapa de distribuição de vazões, determinado através do método da krigagem ordinária. Os valores de vazões, na forma de *layer*, estão sobrepostos ao mapa de limites de bairros da cidade de Curitiba e das cidades circunvizinhas - coordenadas em UTM (*softwares* GEO-EAS™ e SURFER™ 6.0).

A malha, calculada por pontos, obedeceu a uma elipse de pesquisa, anisotrópica, formada por eixos, cujo raio maior possui 2.5km e o menor 600m, inclinada 25° em relação às linhas de UTM - W. O modelo variograma gerou valores para a citada elipse, os seguintes parâmetros:

TABELA 7 - VALORES CALCULADOS PELO VARIOGRAMA PARA DEFINIÇÃO DO ELIPSÓIDE ESTRUTURAL (FIGURAS 62 E 63).

<i>tipo</i>	<i>patamar</i>	<i>raio maior</i>	<i>raio menor</i>	<i>ângulo</i>
exponencial	0.85km	2.5km	0.8km	25°
exponencial	0.35km	100km	0.6km	25°

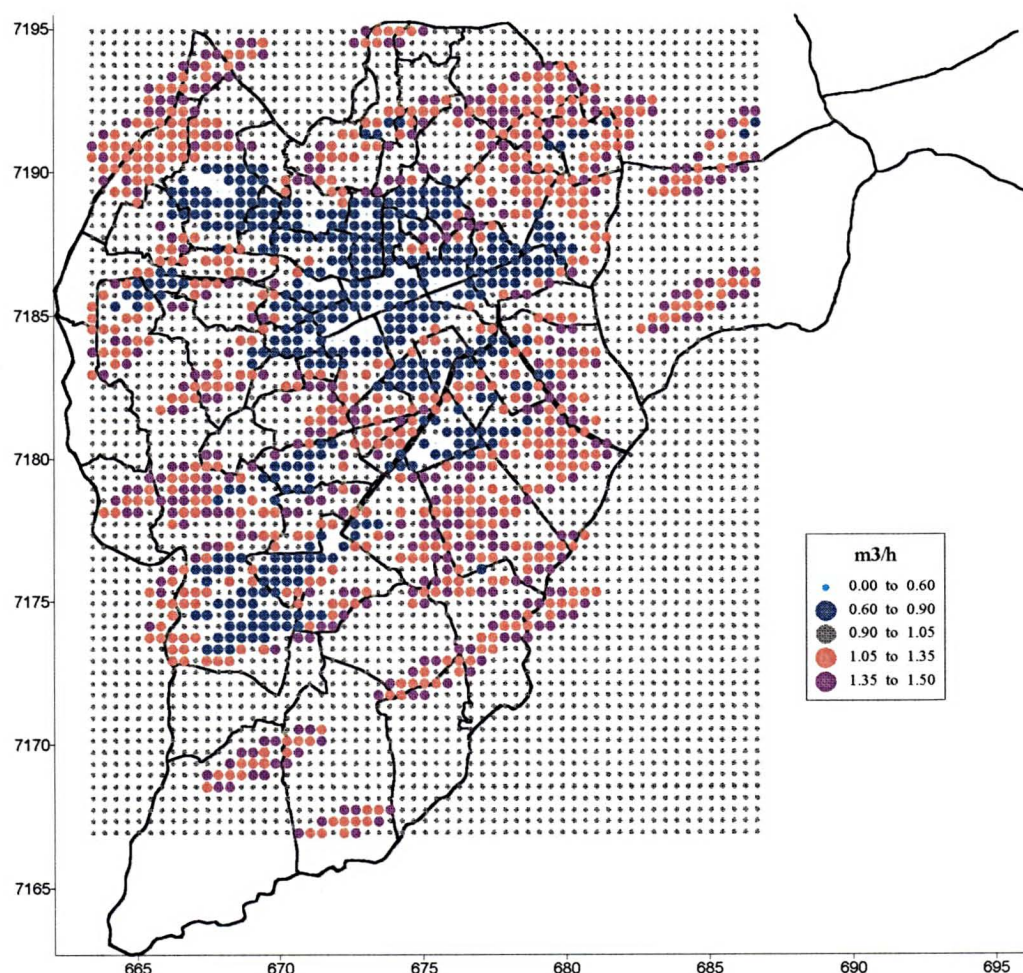


Figura 62 - Mapa de erros associados às vazões, determinado através do método da krigagem ordinária. Os valores de erros, na forma de *layer* estão sobrepostos ao mapa de limites de bairros da cidade de Curitiba e das cidades circunvizinhas - coordenadas em UTM (*softwares* GEO-EAS™ e SURFER™ 6.0).

7.5.1 ANÁLISE DO EFEITO BURACO

A verificação de estruturas do tipo “efeito buraco”, em um variograma, representa a detecção de anomalias relacionadas à dimensão de continuidade espacial das entidades em análise. Estão atreladas às características de configuração do objeto e refletem propriedades intrínsecas do meio.

A interpretação da curva variograma deve revelar as fontes das anomalias detectadas e fornecer indícios sobre características do ambiente, ou seja, da dimensão espacial dos aquíferos.

O efeito buraco, observado nos variogramas, apresenta uma sucessão de “picos” e “depressões” com espaçamento regular de ocorrência (figura 63).

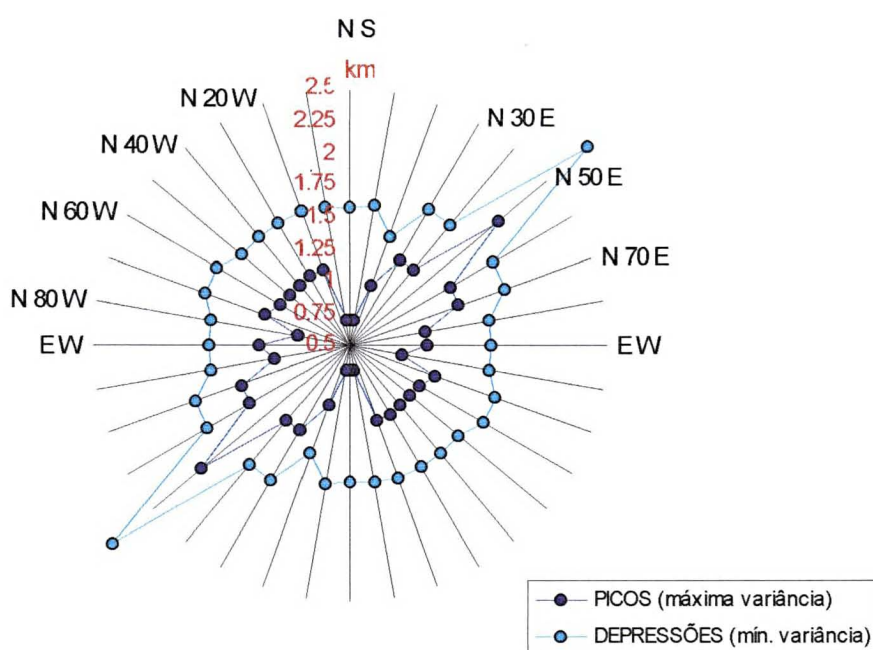


Figura 63 - Distribuição orientada dos valores de máxima e mínima variância, na curva variograma, de vazões em poços tubulares.

Considerando-se que o eixo das ordenadas do variograma mede a “variância *a priori*”, então os picos são as posições em que a variável apresenta comportamento de máxima variância e as depressões, o inverso. Os registros de maior variância significam, realizações onde existem as maiores discrepâncias em torno de um valor esperado. Naqueles pontos, onde a variância é mínima, a continuidade das estimações é maior.

Em hidrogeologia de meios fraturados, este comportamento pode ser traduzido da seguinte forma: ao longo da curva, conforme avança o valor do alcance (*range*), enquanto a função evolui linearmente, percorre-se trechos contínuos do aquífero. Quando surge um valor discrepante, definindo a crista entre as depressões do efeito buraco, registra-se um ponto de mínima abertura das fraturas, onde a variância é máxima.

A tabela 8 apresenta, para cada direção variografada, a distância entre um pico e uma depressão.

TABELA 8 - DADOS DO VARIOGRAMA CONSTRUÍDO PARA VAZÕES, EM AQUÍFEROS DA ÁREA INVESTIGADA, MOSTRANDO O ESPAÇAMENTO ENTRE REGISTROS DO “EFEITO BURACO” (OBTIDO PELO SOFTWARE GEO-EAS™).

DIREÇÃO	Depressão (mínima variância) - km	Picos (máxima variância) - km
E W	1.1	1.6
N 80 E	1.1	1.6
N 70 E	1.4	1.78
N 60 E	1.4	1.78
N 50 E	2.0	2.9
N 40 E	1.27	1.72
N 30 E	1.27	1.72
N 20 E	1.0	1.4
N 10 E	0.7	1.6
N S	0.7	1.57
N 10 W	0.7	1.58
N 20 W	1.13	1.6
N 30 W	1.12	1.6
N 40 W	1.12	1.6
N 50 W	1.11	1.6
N 60 W	1.11	1.7
N 70 W	1.2	1.7
N 80 W	0.9	1.6
E W	1.1	1.6

Exemplificando: quando a curva se inicia, estamos em um ponto qualquer do aquífero, então, na sequência, atingimos um pico de variância. Isto significa que a ascensão até o ponto máximo marca o deslocamento do observador,

de um ponto qualquer do aquífero, em direção a um estrangulamento do mesmo, ou, até a um dos seus limites.

No ponto de máxima variância está-se comparando, em média, pares de valores com máxima diferença, ou posições mais e menos produtivas, o que equivale, geometricamente, a comparar o centro com a borda.

Ao contrário, o ponto de mínima variância, representa a região mais ampla do aquífero. Assim, o efeito buraco marca a comparação entre pares com menor variação, ou com a mesma posição relativa, centro com centro, borda com borda, definindo a dimensão do fenômeno.

Pode-se afirmar, portanto, que dois picos marcam os limites médios de dimensão dos aquíferos da área em estudo. Como a variável é georeferenciada, pode-se medir a dimensão do objeto. Assim, a distância calculada entre picos foi de 5,0 km, na direção N50-70E, e de 2,5km na direção N20-40W (figura 64).

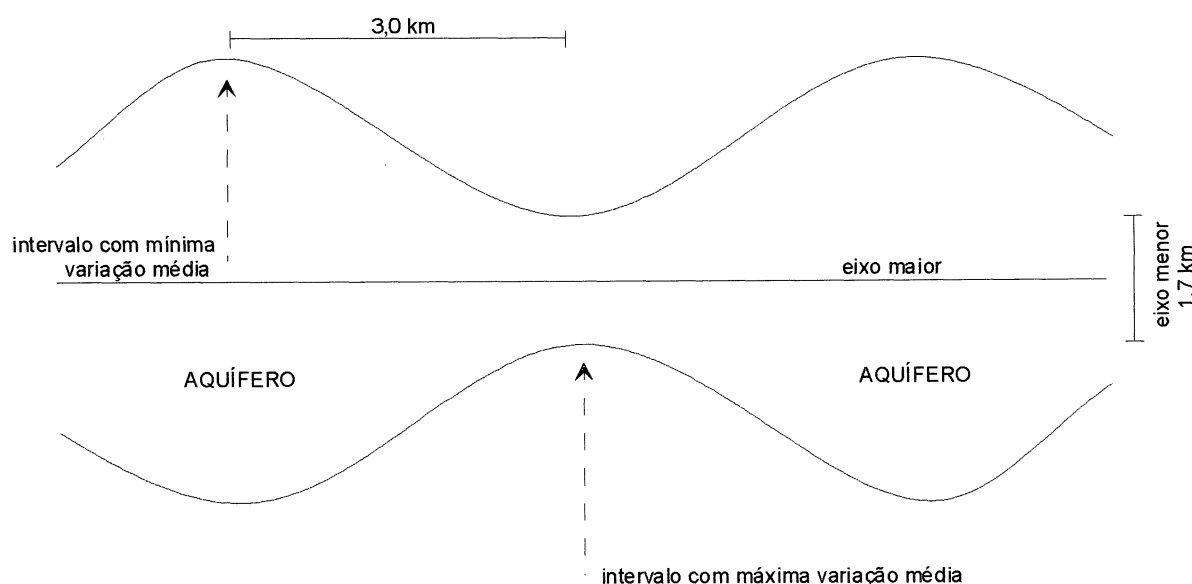


Figura 64 - Dimensões dos aquíferos reveladas pela análise variográfica.

Os parâmetros obtidos com a variografia revelam ainda que existe interferência entre estruturas, de modo que os patamares máximos diferem para cada direção dos eixos do elipsóide. Desta forma, a curva do modelo encontrado foi construída com pares de patamar e de alcance (tabelas 5 e 6).

Esta interferência entre direções estruturais pode apontar para uma evolução policíclica dos fenômenos que modelaram os aquíferos fraturados da área.

A krigagem mostra a combinação de zonas de vazões entre realizações de valores muito diversos. Estas, em conjunto, apontam a direção NE como a principal ressaltando ainda as duas direções E-W e NW, secundárias. As estruturas com direção NW estão relacionadas aos fraturamentos associados aos diques de diabásio.

7.6 SUPERFÍCIE POTENCIOMÉTRICA: TENDÊNCIA E VARIAÇÕES LOCAIS

Os dados de nível estático dos poços tubulares profundos amostrados foram transformados em cotas altimétricas. Considerando-se que as diferenças altimétricas na área de trabalho atingem 156m, a correlação entre valores absolutos de profundidade do nível estático, nada significam.

Os poços tubulares foram georeferenciados em relação às suas coordenadas UTM e, portanto, os dados de nível estático estão, espacialmente, reconhecidos. Aplicou-se o método geoestatístico para determinar o comportamento espacial da variável e realizar estimações de valores em pontos não amostrados.

A primeira determinação estatística foi realizada para revelar as características da distribuição de frequência da população (figura 65).

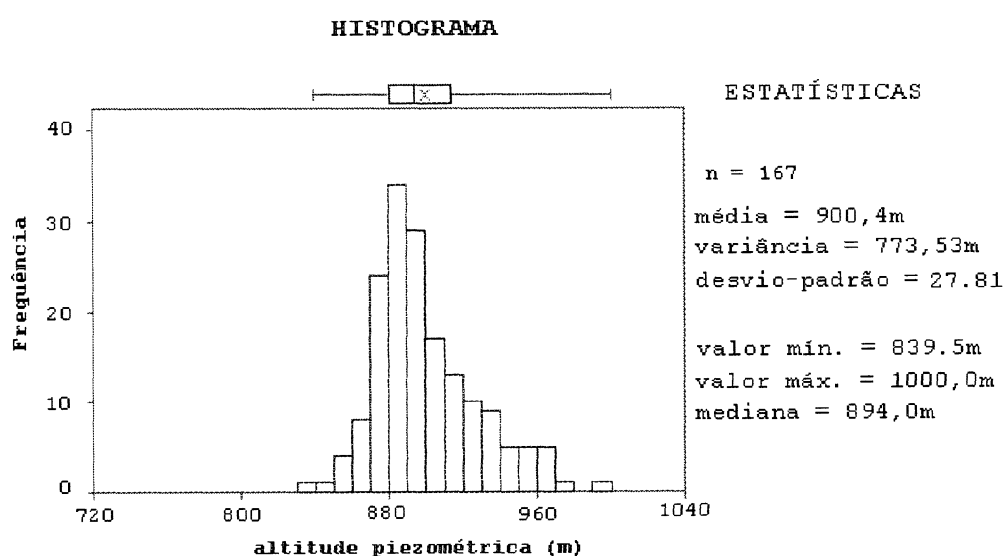


Figura 65 - Histograma de frequência para dados de altitude potenciométrica de poços tubulares profundos (obtido pelo *software* GEO-EASTM).

O histograma demonstra que a população apresenta distribuição aproximadamente gaussiana, assimétrica, fato comprovado pelo gráfico da frequência acumulada (figura 66).

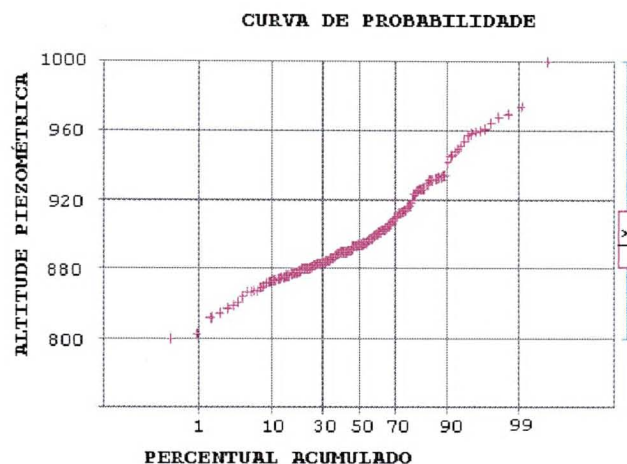


Figura 66 - Curva de probabilidade para dados de altitude potenciométrica de poços tubulares profundos (obtido pelo *software* GEO-EAS™).

Na sequência, foi elaborada a análise estrutural geoestatística. Inicialmente foi construído o variograma geral para detecção do comportamento espacial da variável (figura 67).

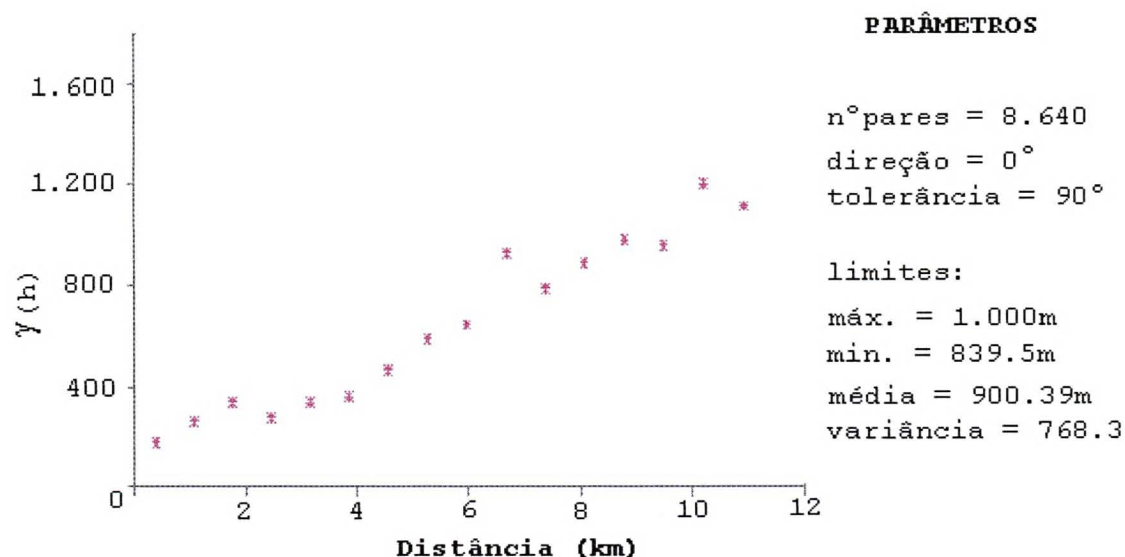


Figura 67 - Variograma dos dados de altitude potenciométrica, obtido com tolerância total, abrangendo todos os quadrantes (*software* GEO-EAS™).

O variograma aponta a manifestação do “efeito deriva”. Um dos fatores responsáveis por este fenômeno resulta da inflexão do substrato da Bacia de Curitiba, imposta pela geometria côncava do leito e é suficiente para gerar desvios, obliterando o comportamento particular da variável.

Para remover esta influência sobre os dados, promoveu-se à análise de superfícies de tendência”.

O polinômio escolhido para representar as tendências foi determinado a partir do percentual de correlação com a superfície em estudo (figura 68).

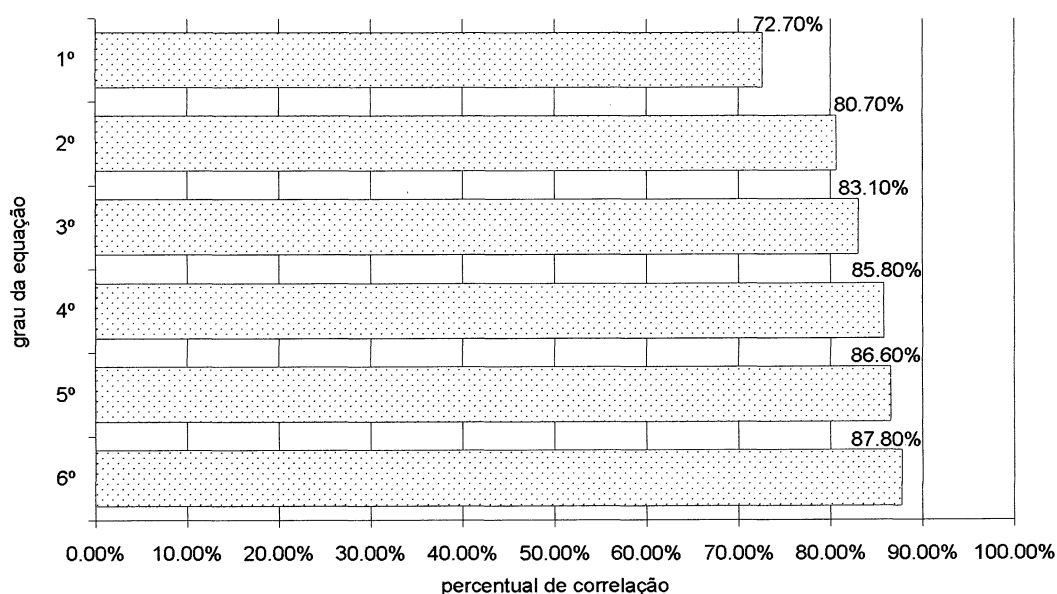


Figura 68 - Gráfico de correlação entre polinômios de ajustes à superfície potenciométrica de poços tubulares (*software ROCKWARE*®).

Foi selecionado o polinômio de terceira ordem para suavizar a superfície potenciométrica. Com isto produziu-se dois novos conjuntos: valores gerados pela aplicação do polinômio à variável e “resíduos”. Estes últimos, naturalmente, registram números positivos e negativos, conforme representem valores “maiores” ou “menores” que a superfície estabelecida pelo polinômio.

Novamente, foi determinada a distribuição de frequência da população, desta vez para os resíduos (figura 69).

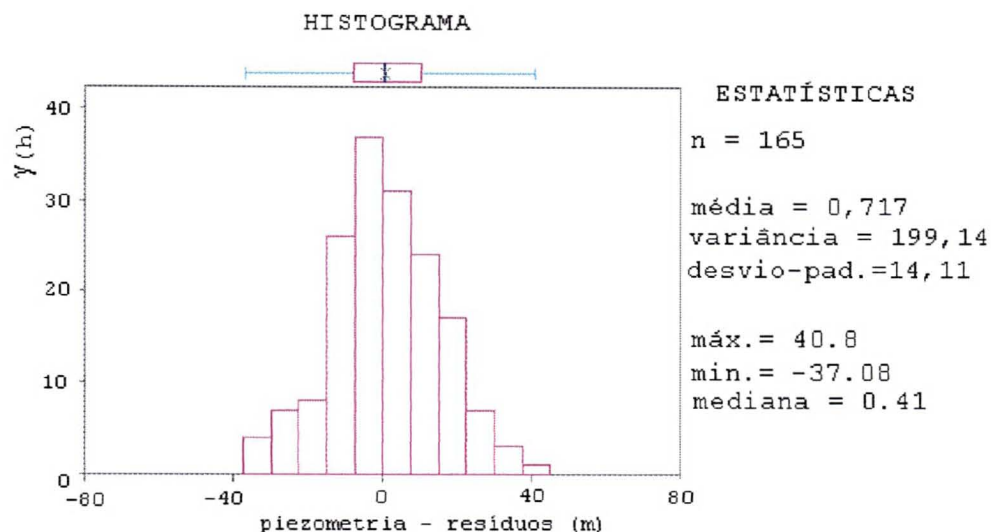


Figura 69 - Histograma de resíduos de dados de potenciometria, produzido por polinômio de terceiro grau (*software* GEO-EAS™), mostrando população normal.

Em seguida, foi realizada a análise estrutural dos dados de resíduos que revelou, através da variografia (figura 70), os parâmetros de krigagem (tabela 9).

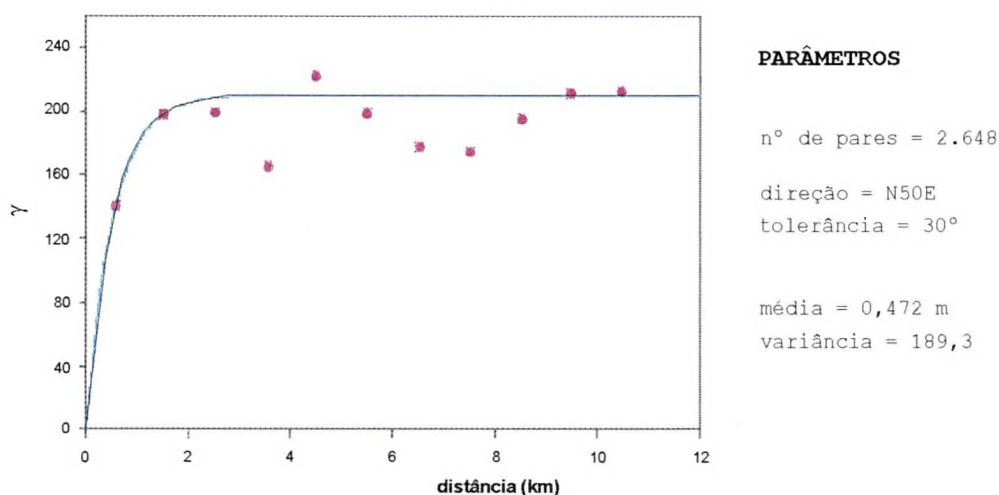


Figura 70 - Variograma dos dados de resíduos de altitude potenciométrica, obtido através da aplicação de um polinômio de 3º ordem. Observa-se a direção do eixo maior do elipsóide estrutural - N50E.

TABELA 9 - PARÂMETROS PARA KRIGAGEM DOS RESÍDUOS DE ALTITUDE POTENCIOMÉTRICA OBTIDOS POR VARIOGRAFIA.

direção	tolerância	modelo	efeito pepita	patamar	alcance
N50E (eixo maior)	30	exponencial	0	210	1.4
N40W (eixo menor)	30	exponencial	0	210	0.7

Os dados de resíduos krigados foram somados aos dados de piezometria corrigidos pelo polinômio de 3°. O resultado desta operação apresenta a distribuição dos valores estimados de altitude potenciométrica, da área em estudo, livres dos efeitos de tendência de mergulho da Bacia de Curitiba (figura 71).

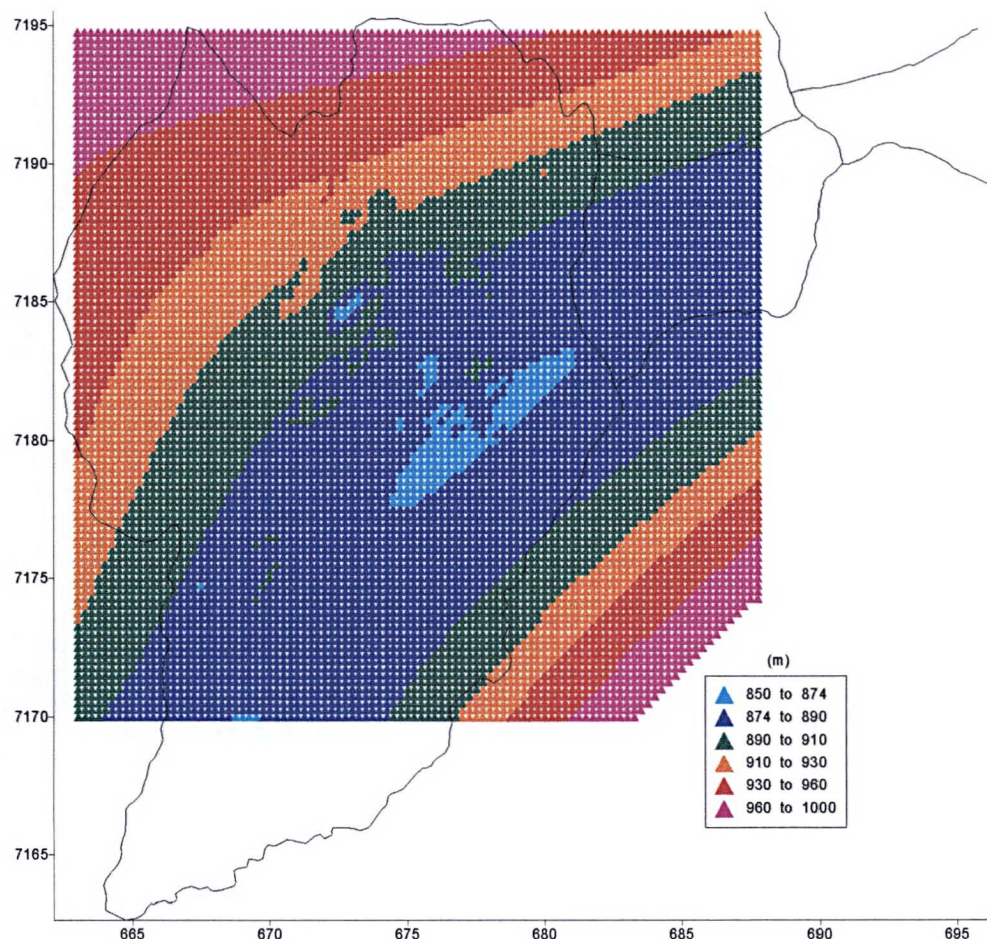


Figura 71 - Resultado da krigagem ordinária dos dados de altitude potenciométrica, isentos de efeitos de tendência, pela aplicação de um polinômio de 3º grau aos dados brutos (coordenadas em UTM) (softwares GEO-EAS, ROCKWARE e SURFER), adicionados aos valores da superfície de tendência. A superfície de tendência mostra a variação regional, enquanto a krigagem mostra os efeitos locais.

Em relação aos resultados expostos pela krigagem dos resíduos de 3º grau, somados aos valores suavizados pelo polinômio, a superposição das células mostra a geração de áreas com grandes vazios de valores krigados, em função da distribuição espacial dos dados, completados unicamente por resultados de tendências, estimados pela aplicação do polinômio. Assim sendo, a demonstração da interpolação dos valores de altitude potenciométrica, considerando-se

unicamente os cálculos de tendência (figura 72), difere muito pouco do mapa da figura 71.

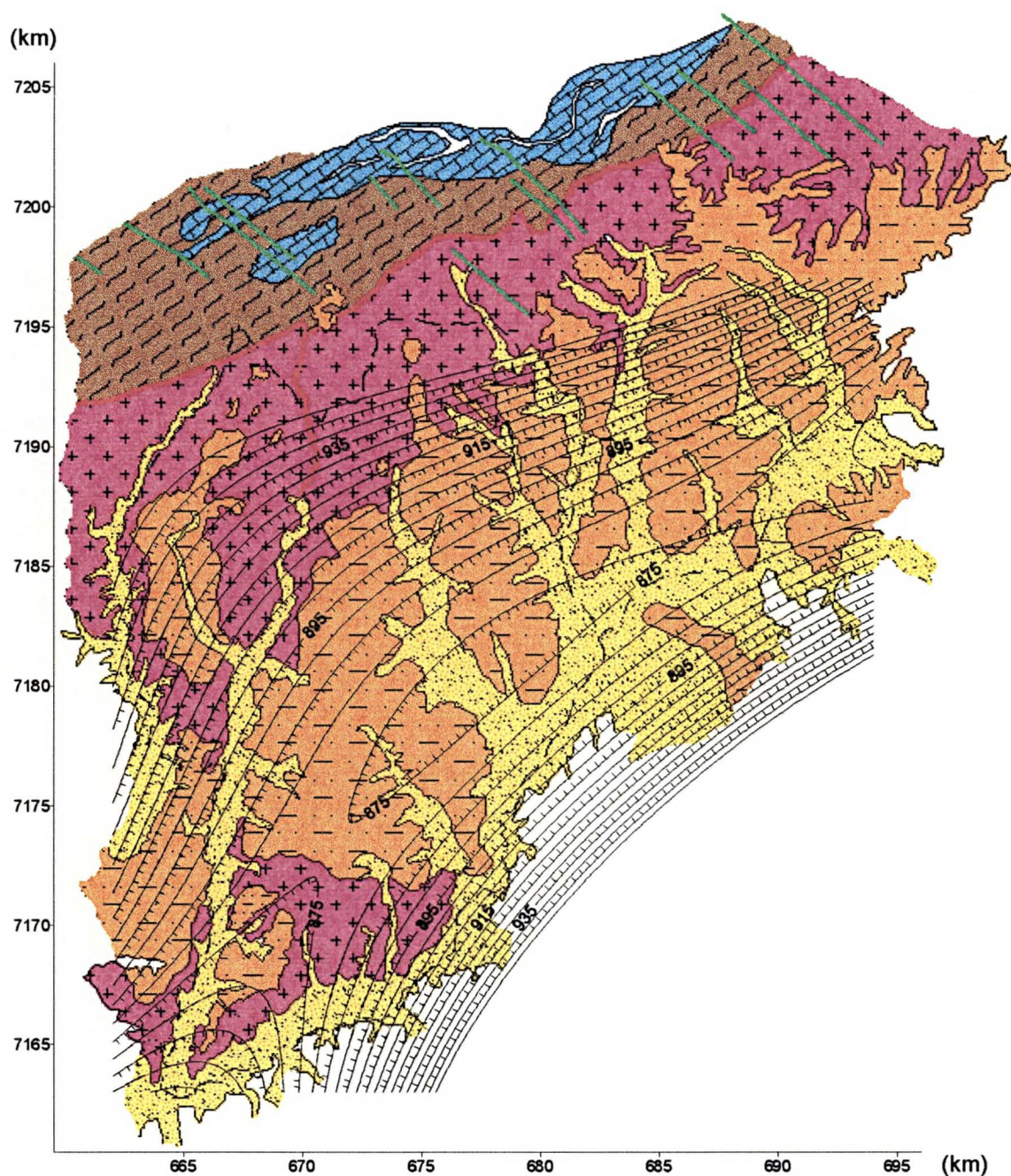


Figura 72 - Mapa de contorno de tendência de 3º grau para altitude potenciométrica (em metros) superposto ao mapa geológico da área de pesquisa (ver legenda na figura 11). Coordenadas em UTM.

A expressão de continuidade da variável representada nas figuras 71 e 72 mostram as mesmas direções preferenciais regionais, NE.

7.7 LIMITE SUPERIOR DOS AQUÍFEROS FRATURADOS

O limite superior dos aquíferos fraturados, foi determinado pela interpolação de valores das cotas altimétricas das entradas d'água registradas durante perfurações de poços tubulares e também compiladas de dados históricos. Estes dados restringem-se a poços tubulares perfurados em rochas cristalinas do Embasamento Cristalino.

A interpolação dos valores foi executada através do método geoestatístico. Inicialmente foi determinado o comportamento da população através da distribuição de freqüência (figura 73).

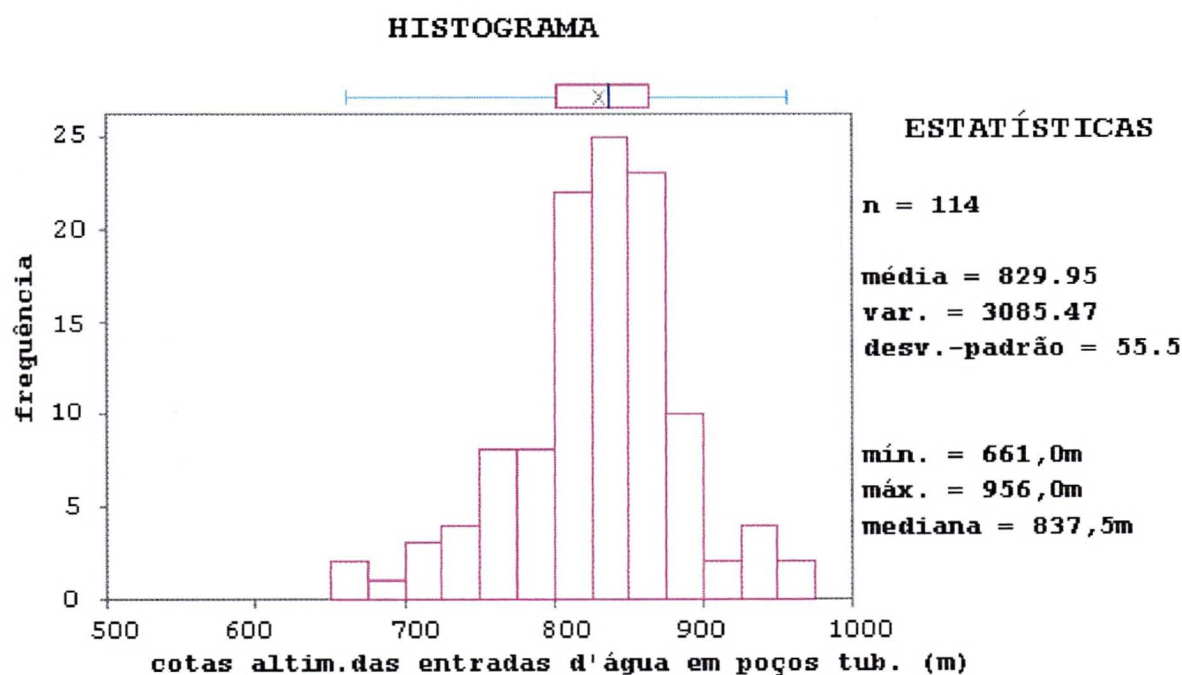


Figura 73 - Histograma de freqüência para dados altimétricos de entradas de água em poços tubulares profundos sobre rochas cristalinas (*software* GEO-EAS™).

O comportamento da população revelou-se aproximadamente gaussiano, insinuando a existência de mais de uma população. Na sequência, procedeu-se a execução do variograma geral, para reconhecimento do comportamento espacial da variável (figura 74).

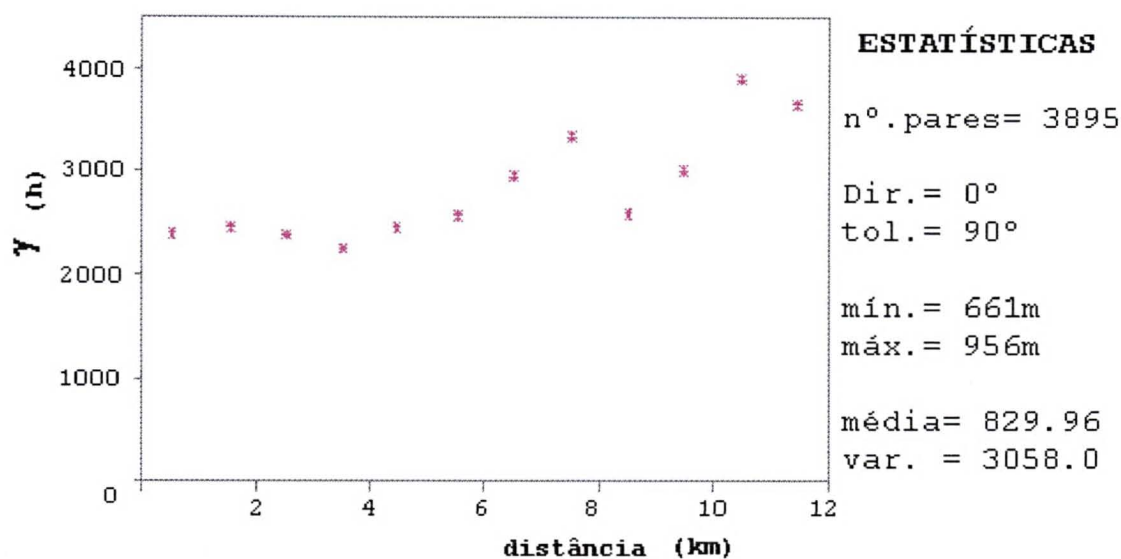


Figura 74 - Variograma total para dados de altimetria das entradas de água em poços tubulares(software GEO-EAS™).

Foi observada, então, a aparente incidência de dois fenômenos:

- Efeito deriva, imposto em função do mergulho do substrato da Bacia de Curitiba;
- Aparente efeito pepita puro, estabelecido pela similaridade de valores da variância *a priori*. Caso se comprove a assertiva, não será possível realizar operações geoestatísticas com esta população, pois não haverá dependência entre realizações.

Para remover o efeito de tendências superimpostas foi promovido o ajuste de superfícies de tendência. O exame do ajuste a diferentes ordens de polinômios, determinou a escolha de uma equação de terceira ordem (figura 75).

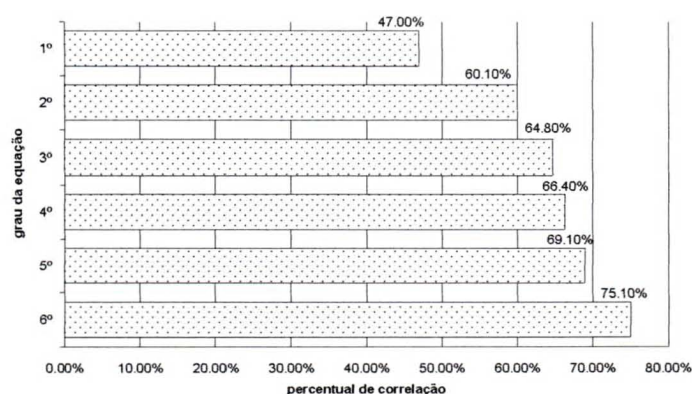


Figura 75 - Percentuais de correlação entre polinômios de graus diversos e a superfície determinada pelos dados brutos de entradas d'água em poços tubulares.

A determinação de subpopulações no histograma de frequência para dados brutos de entradas d'água, é confirmada pelo exame do comportamento das populações estimadas pela aplicação do polinômio. Desta feita, é clara a presença de diversas outras subpopulações, tanto para dados estimados de tendência (figura 76), como para os resíduos (figura 77).

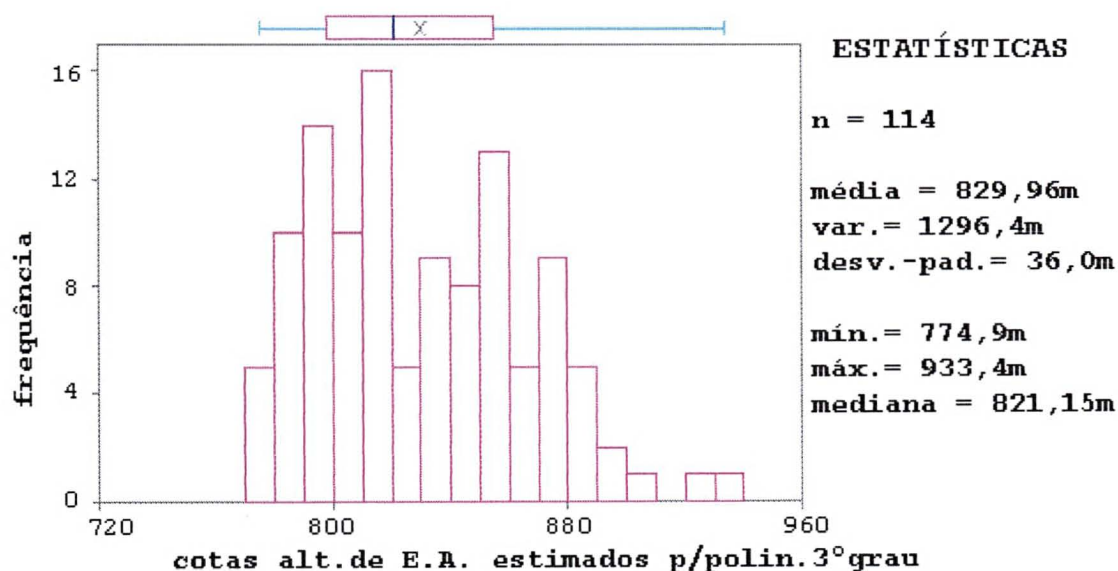


Figura 76 - Histograma de frequências para dados altimétricos de entradas d'água em poços tubulares na região de Curitiba/PR. Observa-se a justaposição de diversas subpopulações (software GEO-EAS™).

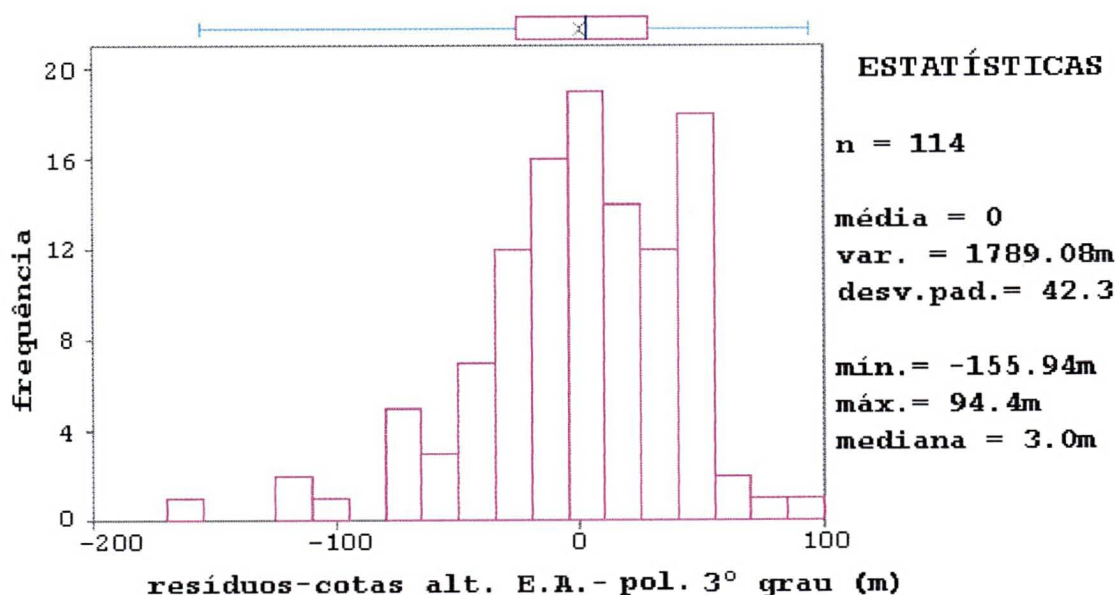


Figura 77 - Histograma de frequências para resíduos, obtidos a partir da aplicação de um polinômio de 3º ordem. Os dados referem-se a cotas altimétricas de entradas d'água em poços tubulares na região de Curitiba/PR (software GEO-EAS™).

Os valores de resíduos foram submetidos a análise variográfica e revelaram, como já se antevia no variograma geral, efeito pepita puro (figura 78), ou seja, a não correlação entre os valores da variável.

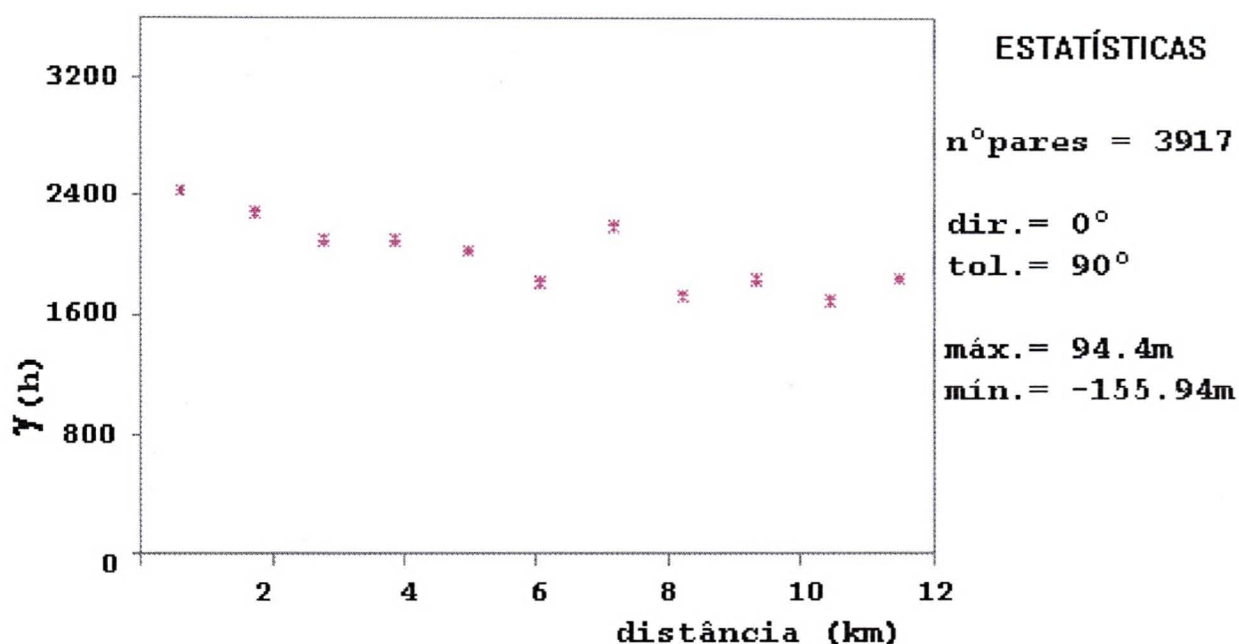


Figura 78 - Variograma dos resíduos, obtidos pela aplicação de um polinômio de 3º grau, sobre dados altimétricos das entradas de água em poços tubulares. A distribuição dos pontos evidencia a ocorrência de efeito pepita puro (*software GEO-EAS™*).

Por não ser possível realizar a krigagem dos valores estimados, em virtude da ocorrência de efeito pepita sobre a distribuição dos valores variograma, a gridagem da distribuição dos nível altimétricos de entradas d'água, somente pode ser apresentada sob a forma de curvas de tendência estimada, sem a determinação dos erros associados. Desta forma, foi vetorizado um mapa de tendências, a partir de um polinômio de 3º ordem, com ajuste de 65% (figura 79).

A construção da malha, para interpolação de valores, observou dimensões de 300m de lado, para cada célula quadrada que é a mesma dimensão utilizada para a gridagem das outras variáveis em discussão.

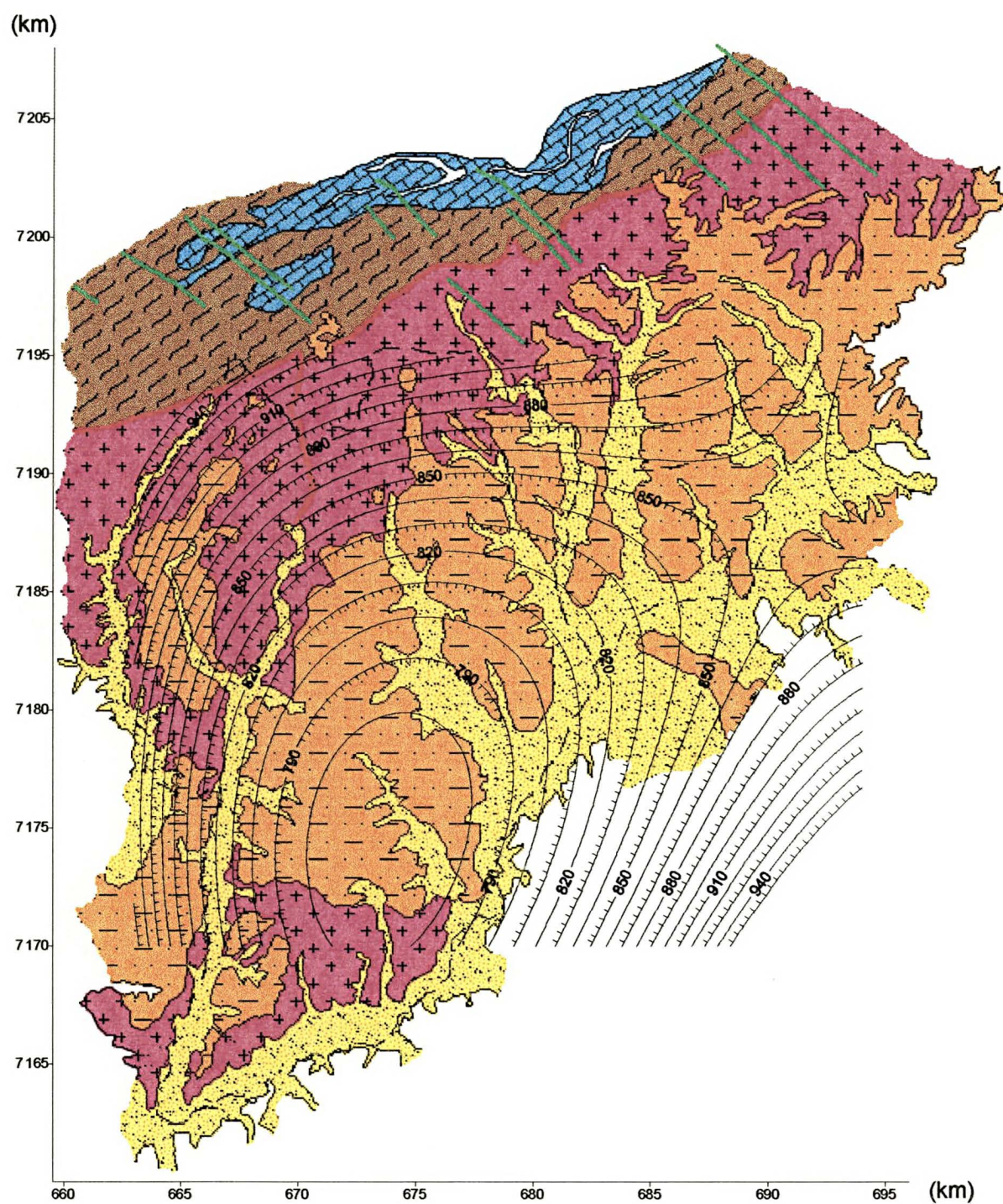


Figura 79 - Curvas de contorno de tendência de 3º ordem (em metros), de cotas altimétricas das entradas d'água em poços tubulares, sobreposto ao mapa geológico da área (legendas na figura 11). Coordenadas em UTM.

7.8 MAPA DE ISÓBATAS DOS SISTEMAS AQUÍFEROS

Mapas de isóbatas são comumente empregados em pesquisa petrolífera e revelam a espessura de capeamento sobre a superfície potenciométrica. Tem a função de indicar as linhas gerais de fluxo do sistema.

O mapa de isóbatas foi obtido da seguinte maneira: as curvas altimétricas, digitalizadas, foram convertidas em formato ASCII, de maneira a listar os valores das altitudes de cada nó, que compõem as curvas do terreno, em tabelas, as quais foram armazenadas em arquivos. Em seguida os valores altimétricos da superfície do terreno foram interpolados para produção de uma malha regular, quadrada, com células de 300m. Esta interpolação foi realizada através do método das superfícies de tendências, com o emprego de um polinômio de segunda ordem.

Os dados de potenciometria, já disponíveis em formato ASCII, obtidos quando da produção do mapa potenciométrico foram regridados também para uma malha quadrada, com unidades de 300m, de maneira a coincidir as coordenadas geográficas ponto a ponto, de cada uma das duas variáveis.

A partir das duas malhas, equidimensionais e geograficamente idênticas, foi realizada a subtração dos grids, produzindo-se o mapa de isóbatas (figura 80).

7.9 SEÇÕES GEOLÓGICAS

Os mapas de contorno produzidos revelam tendências de fluxo da água subterrânea que apontam para mais de uma direção preferencial. Os divisores do fluxo subterrâneo, aparentemente, não coincidem com os limites superficiais entre bacias hidrográficas. Estas diferenças estão ressaltadas em seções geológicas traçadas sobre a área de pesquisa.

Uma seção realizada ao longo do setor sudeste da área (BB' - anexo 2), considerou especialmente poços tubulares, cujo principal aporte de água provém de arcósios da Formação Guabirotuba. Neste corte verifica-se, nos aquíferos sedimentares, a separação do fluxo subterrâneo, determinada por pequeno

gradiente hidráulico, e o limite superficial entre as bacias do rio Iguaçu e Ribeira do Iguaçu.

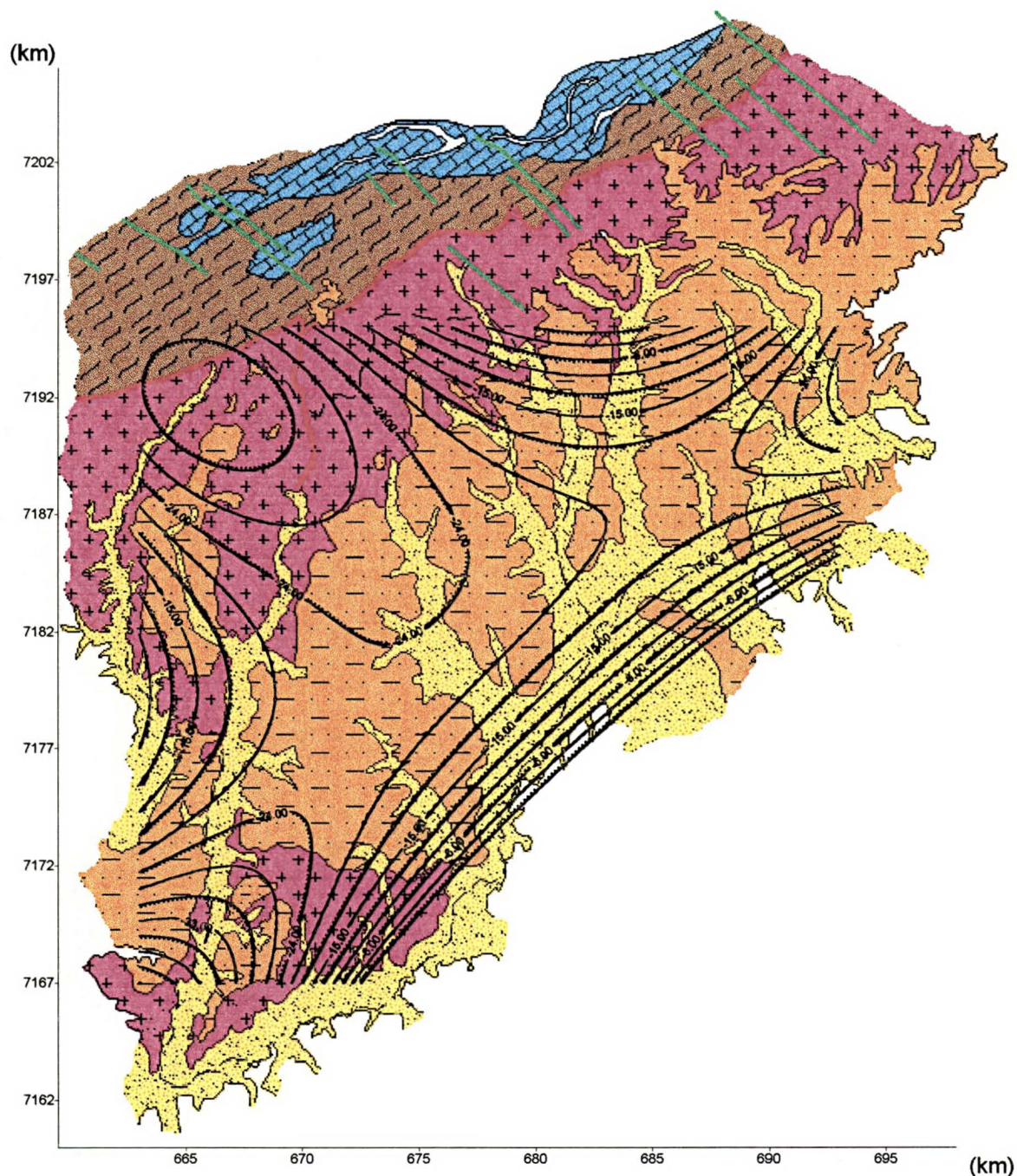


Figura 80 - Mapa de isóbatas, entre a superfície topográfica do terreno e a superfície potenciométrica (em metros), sobreposto ao mapa geológico da área. O mapa de isóbatas foi obtido pela subtração entre o mapa das cotas topográficas da superfície do terreno e o da altitude potenciométrica (figura 72). Coordenadas em UTM (softwares AUTOCAD 12, ROCKWARE e SURFER 6.0™).

Para a construção da seção geológica BB', foram investigadas todas as unidades de captação que extraem água dos arcósios da Formação Guabirotuba, cadastradas, até então, na SUDERHSA. Entretanto, foram utilizados apenas aqueles poços cujos perfis construtivos demonstraram consistência com os parâmetros hidráulicos dos arcósios da Formação Guabirotuba. Desta forma, e também pela distribuição, em área, dos poços, ser muito irregular estão representados apenas três unidades.

Tanto na seção BB' como na seção DD' (anexo 4) pode-se observar a distribuição restrita dos aquíferos das lentes de arcósios, os quais concentram-se especialmente nas porções sudoeste e nordeste da bacia.

A seção geológica AA' (anexo 1), traçada desde a área dos aquíferos cársticos, cruza perpendicularmente o eixo maior da Bacia de Curitiba no sentido noroeste-sudeste e expõe as maiores espessuras de sedimentos e relações prováveis entre aquíferos fissurados.

Traçado no sentido nordeste-sudoeste a seção CC' (anexo 3), assim como a seção AA', demonstra a disposição favorável do relevo e dos estratos da bacia à percolação de água subterrânea desde os pontos mais elevados, próximos aos aquíferos cársticos, até as zonas deprimidas, próximas ao eixo da bacia.

Ambas as seções destacam relações hipotéticas de comunicação entre sistemas de descontinuidades, os quais permitem o fluxo subterrâneo, conforme apresentado anteriormente em mapas de contorno.

7.10 HIDROGEOQUÍMICA

Dados hidrogeoquímicos, obtidos a partir de análises físico-químicas, das águas de poços tubulares, foram analisados procurando-se:

- a) detectar evidências de mistura de águas entre os aquíferos, o que poderia indicar eventual intercomunicação entre os mesmos;
- b) rastrear o comportamento do fluxo subterrâneo;
- c) demonstrar aspectos de potabilidade.

A troca de águas entre aquíferos pode ser investigada a partir da delimitação de fácies hidrogeoquímicas existentes. Esta perspectiva é positiva se forem consideradas diferenças composicionais entre as diversas litologias que hospedam os aquíferos. Conforme descrito nos capítulos sobre unidades geológicas e aquíferos, observa-se que:

- aquíferos representados por lentes arcossianas da Formação Guabirotuba estão associados a um ambiente rico em argilas montmoriloníticas e areias quartzo-feldspáticas;
- aquíferos fraturados de rochas do Complexo Migmatítico-Gnáissico encontram-se em um ambiente dominado por litologias silicáticas;
- aquíferos cársticos, localizados a norte da área investigada, estão inseridos em um meio onde prevalecem rochas carbonáticas.

Para a determinação de fácies hidrogeoquímicas, recorreu-se ao diagrama de Piper (figura 81). As análises laboratoriais foram selecionadas a partir do resultado do balanço iônico. Foram descartadas todas aquelas cujas diferenças registraram valores superiores a 10%. Também foram descartados boletins onde não existiam análises para alguns dos “íons maiores”.

A nomenclatura das fácies hidrogeoquímicas, adotada para a simbologia dos pontos amostrados, observou aspectos relacionados ao perfil dos poços tubulares, os quais podem ser subdivididos em cinco situações:

- Poços perfurados em áreas onde não existem sedimentos da Formação Guabirotuba e que captam águas, unicamente de fraturas em rochas do Complexo Migmatítico-Gnáissico;

- Poços cuja perfuração atravessou sedimentos da Bacia de Curitiba e atingiu fraturas das rochas migmatíticas. Como a coluna de sedimentos encontra-se revestida, aproveitam águas, exclusivamente, de fraturas do embasamento;
- Poços em que a perfuração atravessou sedimentos da Bacia de Curitiba e fraturas de rochas migmatíticas. Apresentam filtros instalados na porção de sedimentos arcóseos e captam água tanto em fraturas do embasamento como em sedimentos. Neste caso existe, evidentemente, mistura das águas dos dois sistemas aquíferos.
- Poços parcialmente penetrantes em sedimentos que explotam, exclusivamente, águas das lentes arcóseas da Formação Guabirotuba;
- Poços que captam, exclusivamente, águas do aquífero cárstico.

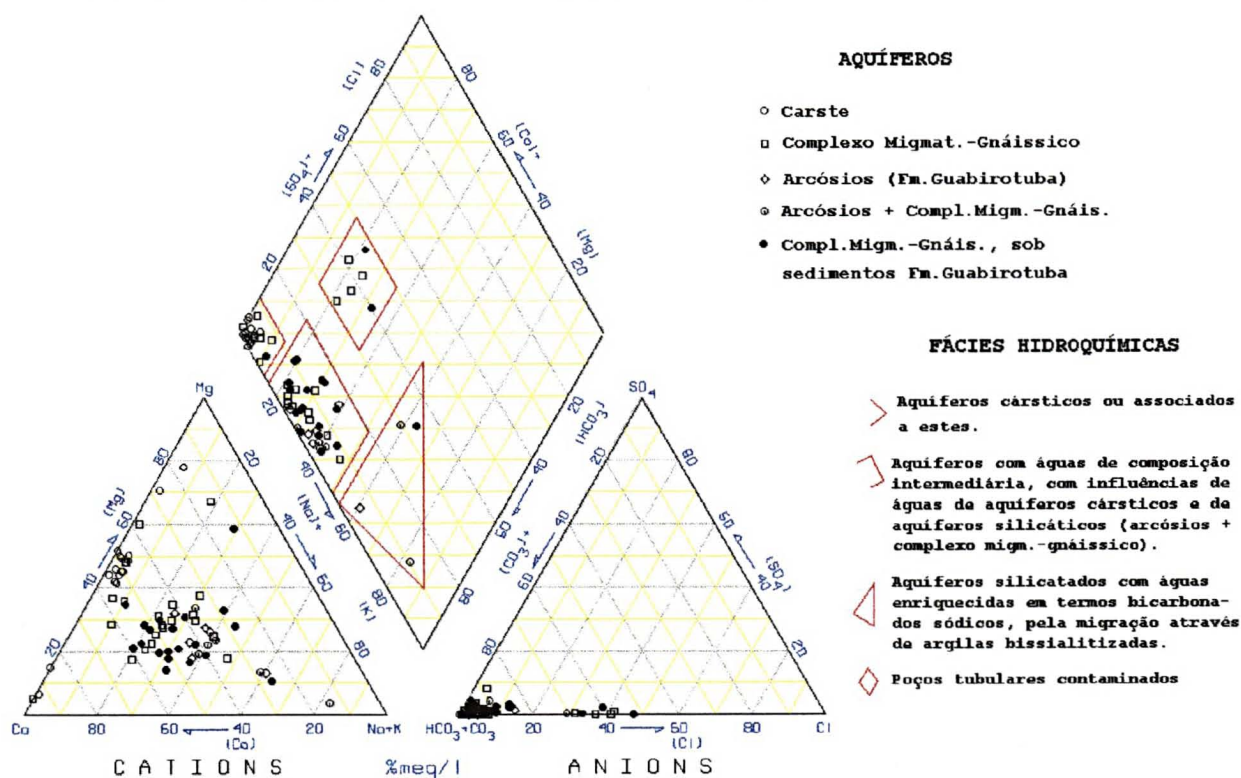


Figura 81 - Diagrama de Piper, com a delimitação de fácies hidrogeoquímicas (número de amostras = 71).

A inclusão de águas do carste, neste estudo, foi realizada por:

- apresentarem o maior potencial hidráulico da região;
- localizarem-se nas mais elevadas cotas altimétricas;

- estarem seccionados por diques de diabásio, intrudidos extensivamente ao longo da área de pesquisa;
- apresentarem composição química diversa de quaisquer dos outros aquíferos em estudo.

Além das fácies hidroquímicas, foram promovidas observações sobre a saturação das águas em relação a derivados silicatados. A concentração de determinados íons revelou a propensão do meio à formação e equilíbrio de certos argilominerais, pela atuação de processos intempéricos. A disponibilidade dos íons formadores dos argilominerais, depende da composição química das rochas por onde as águas fluem. Assim, o equilíbrio das águas com campos de estabilidade para aluminossilicatos, está relacionado ao quimismo das rochas, com as quais as águas estiveram em contato e estabeleceram reações de dissolução/precipitação.

Ao se reconhecer em que domínio de estabilidade dos aluminossilicatos encontram-se cada um dos aquíferos examinados, pressupõem-se revelar propriedades distintas, especialmente, entre as águas dos arcósios e do embasamento cristalino. Estas duas litologias apresentam características geoquímicas muito similares, pois ambas possuem mineralogia rica em aluminossilicatos. Além do que, por estarem, espacialmente, muito próximas, as águas que por elas infiltram, provavelmente refletem características médias entre as litologias.

O procedimento adotado para discriminar composições químicas em aquíferos de rochas silicáticas, emprega a plotagem de concentrações iônicas balanceadas em diagramas (Tardy, 1970). São gráficos que estabelecem campos definidos de produtos de alteração para águas que, em contato com rochas silicatadas, desenvolveram ou não, produtos intempéricos, conforme a favorabilidade a certas reações químicas.

As concentrações logaritmadas de sódio, potássio e cálcio *versus* teores de sílica foram plotados em diagramas (figuras 82, 83 e 84). Para subdividir os campos de estabilidade e individualizar ainda mais as concentrações iônicas, foram demarcados os limites da fugacidade de CO₂.

A distinção entre águas com possíveis produtos de alteração diferenciados, empregou a mesma nomenclatura adotada no diagrama de Piper, onde foram considerados aspectos do projeto construtivo dos poços tubulares.

A concentração dos íons nas águas subterrâneas varia conforme o aporte de água de recarga. Em aquíferos fraturados, propriedades hidráulicas, como permeabilidade, condutividade e coeficiente de armazenamento, variam de maneira expressiva de um ponto para outro. Então, como o fluxo não é homogêneo, a variação na concentração iônica nas águas pode variar também em função de variáveis hidráulicas. Não obstante, o fluxo seguirá tendências preferenciais, conforme o gradiente da área, expressos posteriormente.

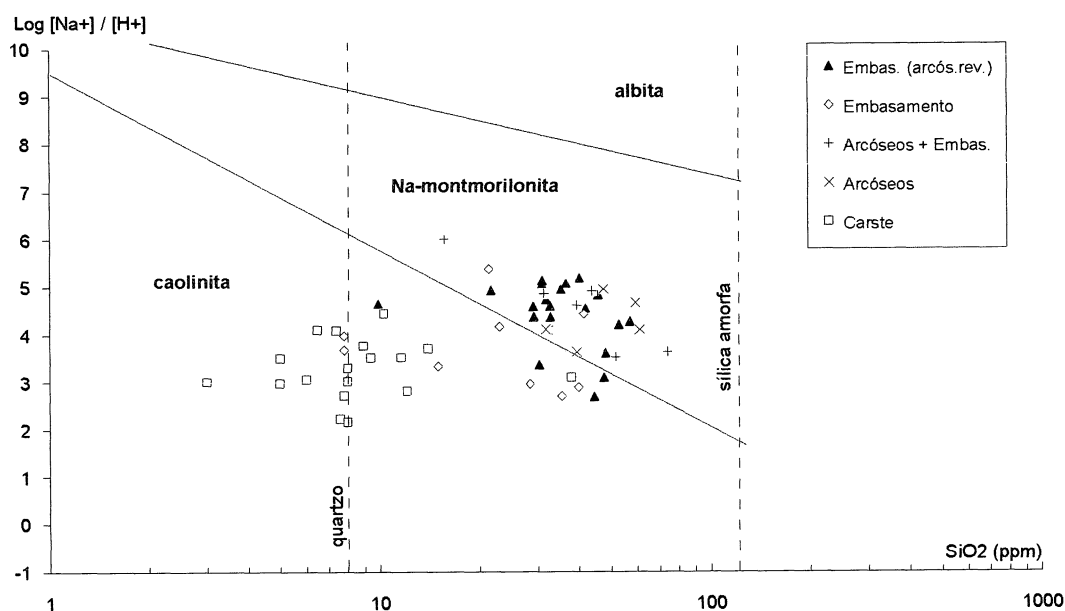


Figura 82 - Diagrama de Khorzinskii, mostrando campos de estabilidade de produtos de alteração em relação ao íon sódio. Amostras coletadas em poços tubulares. Onde se lê "arcósios", entenda-se: lentes de arcósios da Formação Guabirotuba e "embasamento", faz referência a rochas cristalinas do Complexo Migmatítico-Gnáissico, onde se alojam aquíferos fraturados.

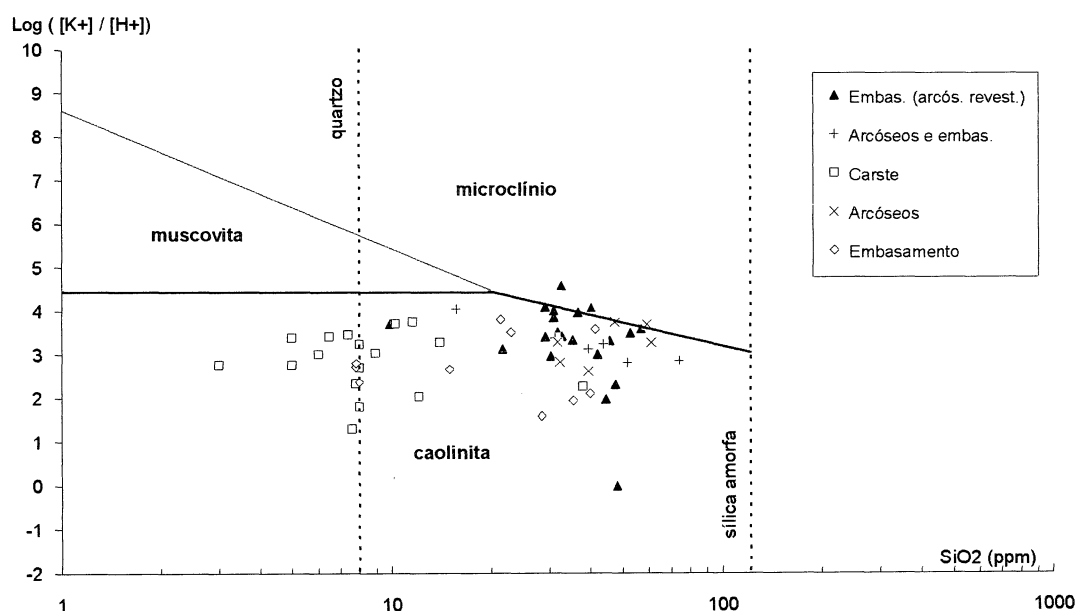


Figura 83 - Diagrama de Khorzinskii, mostrando campos de estabilidade de produtos de alteração em relação ao íon potássio. Amostras coletadas em poços tubulares.

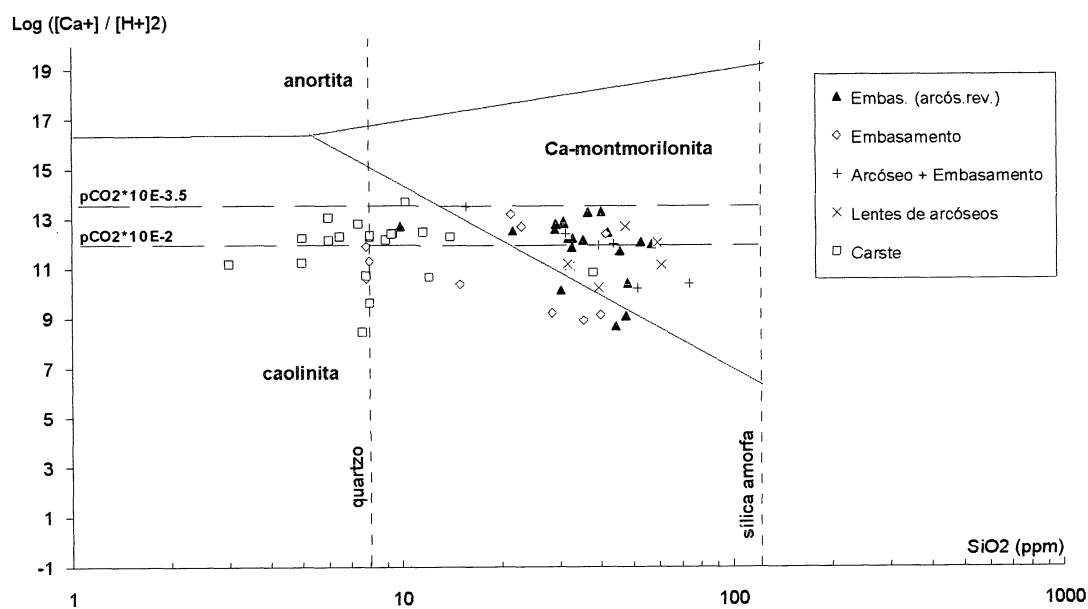


Figura 84 - Diagrama de Khorzinskii, mostrando campos de estabilidade de produtos de alteração em relação ao íon cálcio. Amostras coletadas em poços tubulares.

A distribuição dos íons analisados indicam tendências de fluxo subterrâneo na área de pesquisa.

Foram construídas superfícies de tendência, para representar o comportamento espacial das seguintes variáveis hidroquímicas: sódio, potássio, cloro, cálcio, bicarbonato, sólidos totais dissolvidos e sílica, representados nas figuras 85, 86, 87 e 88. Para todos foram adotados os procedimentos da geoestatística, mas não foi possível realizar operações de krigagem, em função grande irregularidade da malha amostral, que na distribuição de valores estimados gerava grandes zonas com valores de erro associado bastante elevado. Desta forma, preferiu-se apresentar os resultados na forma de superfície de tendência.

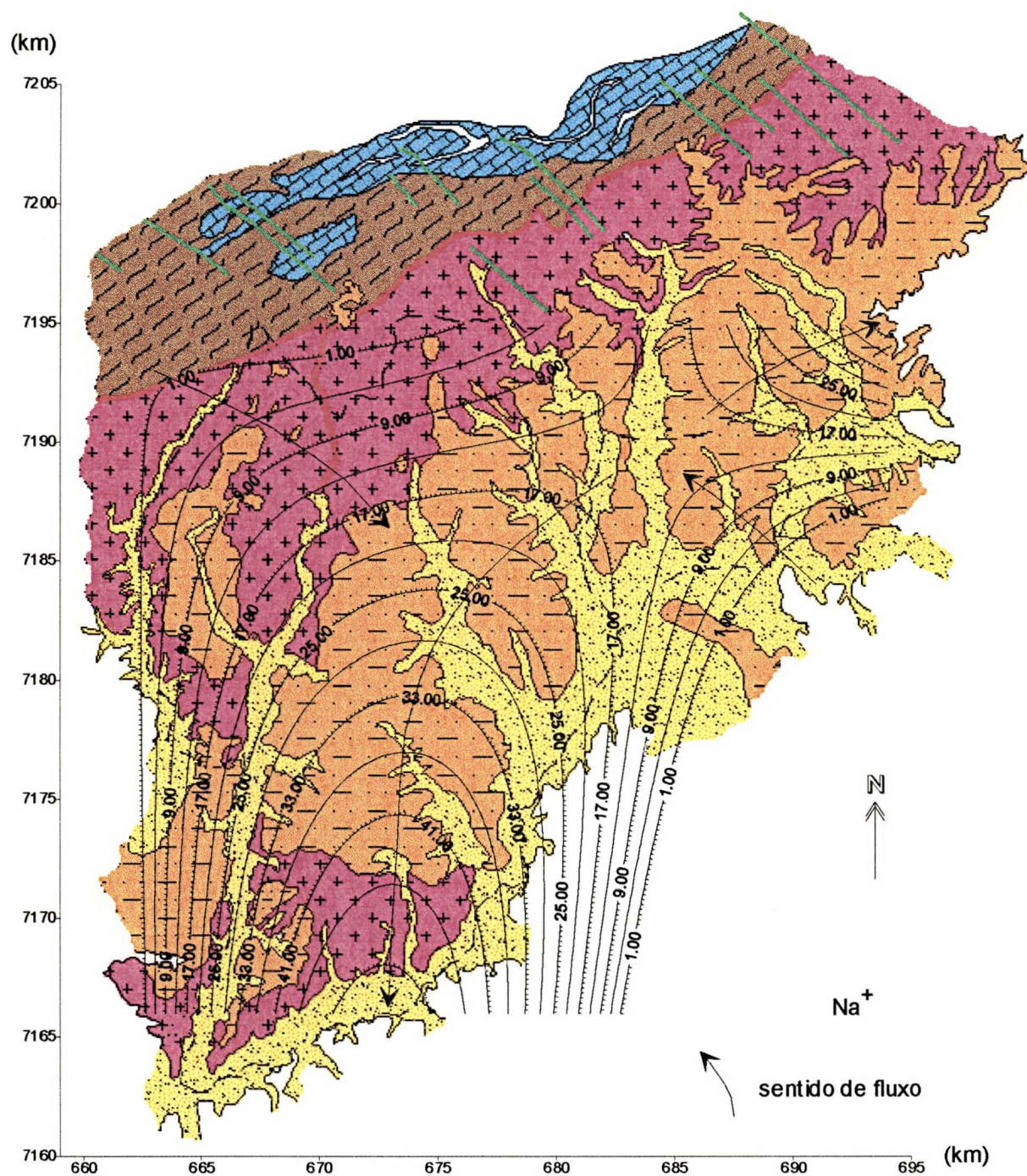


Figura 85 - Distribuição de valores de concentração do íon sódio, em ppm, estimados por superfície de tendência do 3º grau. As curvas estão sobrepostas ao mapa geológico da área (legendas na figura 11). Coordenadas em UTM.

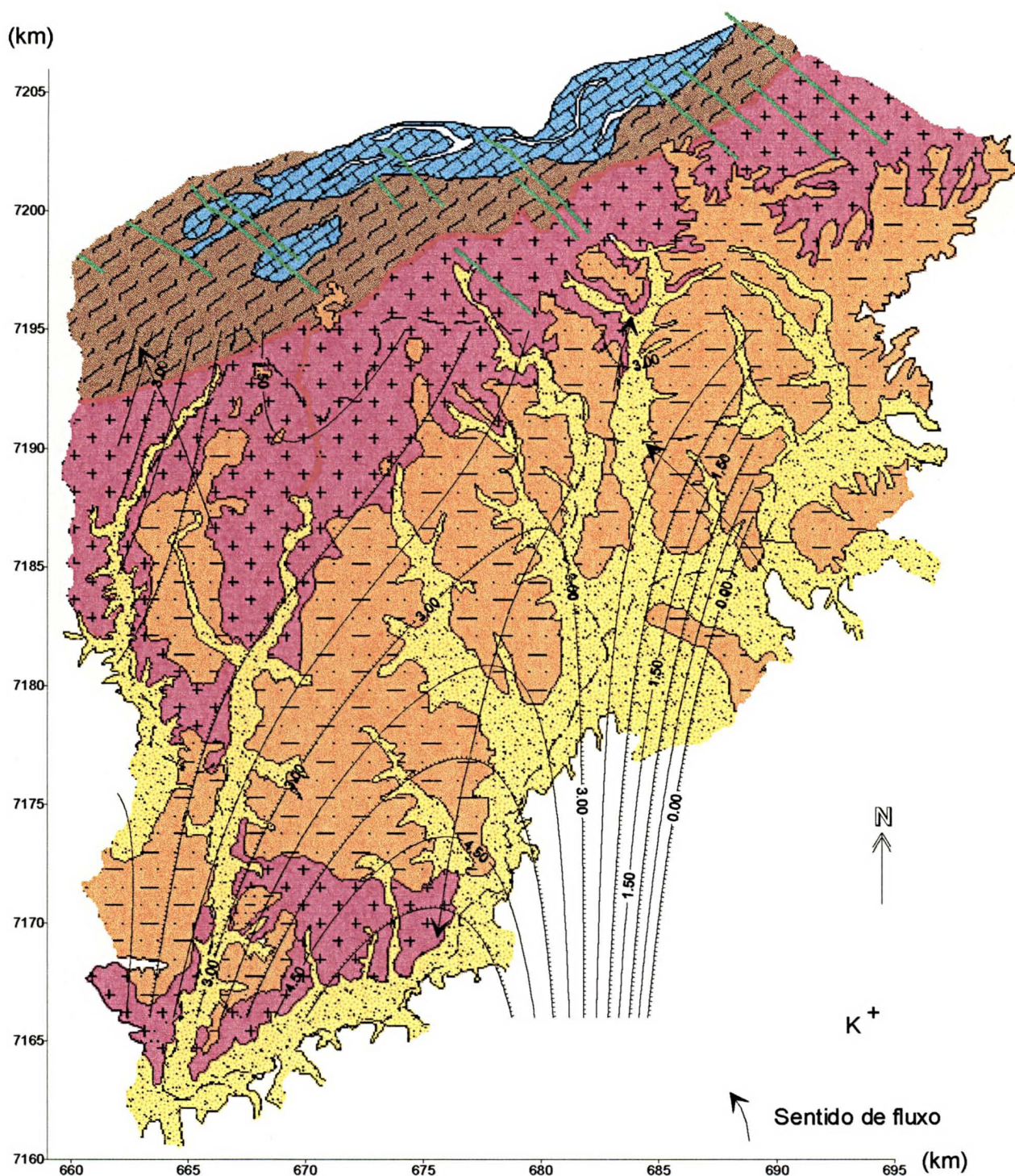


Figura 86 - Distribuição de valores de concentração do íon potássio, em ppm, estimados por superfície de tendência do 3º grau. As curvas estão sobrepostas ao mapa geológico da área. Coordenadas em UTM.

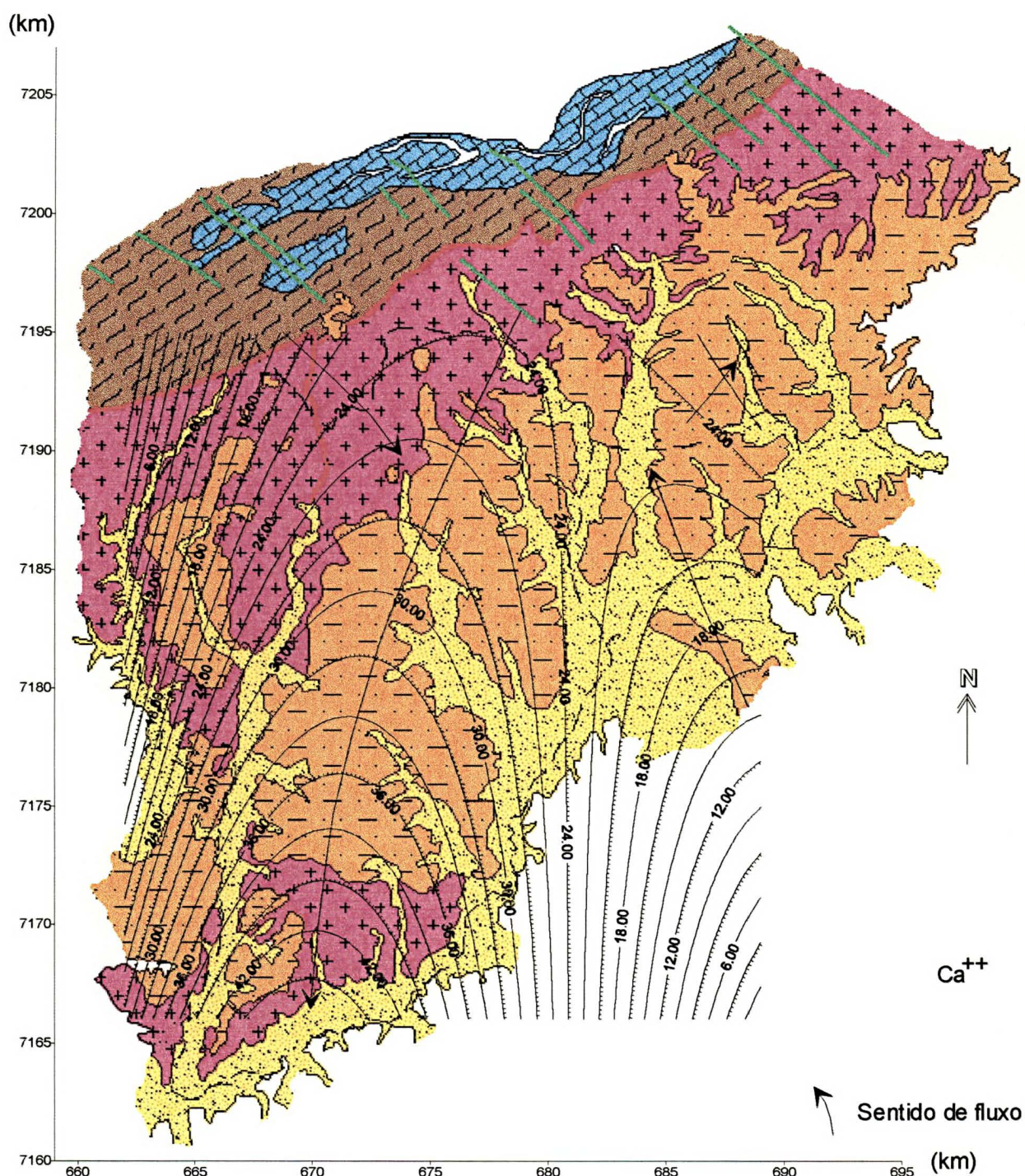


Figura 87 - Distribuição de valores para o íon cálcio, estimados por superfície de tendência do 3º grau. As curvas estão sobrepostas ao mapa geológico da área (legendas na figura 11). Valores em ppm. Coordenadas em UTM.

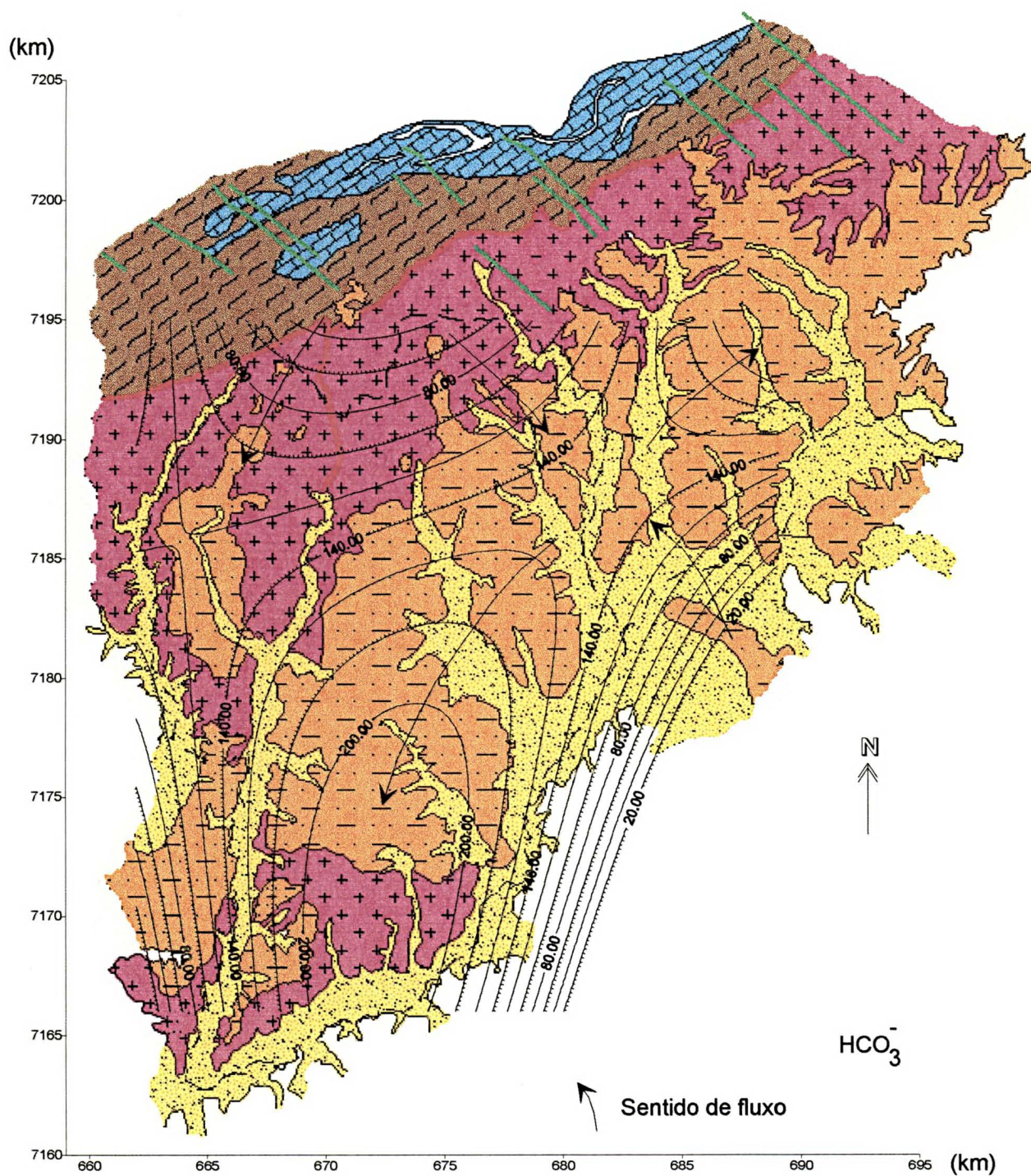


Figura 88 - Distribuição de valores para o HCO_3^- , estimados por superfície de tendência do 3º grau. As curvas estão sobrepostas ao mapa geológico da área (legendas na figura 11). Valores em ppm. Coordenadas em UTM.

8 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os comentários sobre os resultados, advindos da aplicação dos métodos empregados, foram reunidos em um único capítulo para concatenar a associação entre os produtos. Esta associação é indispensável, pois as variáveis foram analisadas com o propósito de revelar características e possíveis inter-relações entre os sistemas aquíferos da área.

O comportamento estatístico dos dados de vazões, indica que o número de realizações utilizado, em função da amplitude dos valores, é ainda reduzido, apesar de representativo, e, por este motivo, a distribuição de frequência configura população do tipo log-normal. Prova disto é que algumas variáveis, do conjunto analisado, apesar de referirem-se à mesma entidade - os sistemas aquíferos - apresentam resultados não exatamente coincidentes entre si. Vários exemplos podem ser encontrados comparando-se direções de "trends" estruturais de variáveis diversas.

A análise estrutural revelou que a maior continuidade da variável "vazões" ocorre na direção N75E enquanto a menor posiciona-se segundo N15W, definindo o elipsóide estrutural. Entretanto, os mapas de alinhamentos estruturais (figuras 20, 28, 29 e 30) indicam estruturas apontando para NS, N50-60W, N20-30W, E-W e N50-60E.

As direções noroeste estão, evidentemente, associadas aos diques de diabásio, que possuem importância relevante no fluxo de água subterrânea, mas não associa-se diretamente a elevadas vazões. Portanto não se esperava que o mapa de vazões indicasse direção coincidente ao dos diques.

A direção norte-sul representa zonas de descontinuidades onde se instalaram importantes drenagens, entretanto estão pouco distribuídas pela área. As direções nordeste, por outro lado, são aquelas que representam as estruturas mais importantes ao controle dos aquíferos. Representa a mesma direção do eixo maior da Bacia Sedimentar de Curitiba. Também é a mesma direção das principais estruturas que controlam a geometria das unidades proterozóicas da Faixa de Cizalhamentos Ribeira (Figura 2).

Registra-se, no entanto, diferença de 15° entre a direção encontrada por variografia para os aquíferos e as estruturas mapeadas em superfície. Na medida em que novas amostras reduzirem a concentração de pontos, a correlação entre pares associará, de maneira mais evidente, os resultados da análise estrutural com as estruturas mapeadas.

A variografia, portanto, revelou a existência de relações estruturais entre a configuração espacial dos aquíferos em estudo e feições tectônicas.

O variograma geral aponta, em uma análise inicial (figura 58), aparente efeito pepita. No entanto, na medida em que o alcance é restringido, revela-se um comportamento parabolóide no início da curva, auferindo continuidade aos resultados (figura 59). A verificação de efeito pepita, no início da curva, indica alguma imprecisão na verificação dos valores de vazões.

Este indício é absolutamente normal, considerando-se que muitos dados, apesar de revistos, referem-se a unidades construídas a décadas e que na medida em que mais unidades de captação vão sendo perfuradas ao longo dos aquíferos, as vazões iniciais, mesmo que registradas a poucos anos, tendem a sofrer alterações.

Por outro lado, a aferição dos valores de vazões em meio fraturado é relativamente incerta, uma vez que ainda não existem métodos suficientes de determinação de parâmetros hidráulicos em meio fraturado.

Os resultados da análise variográfica, para a variável vazão, confirmam a condição de validação para a abordagem dos aquíferos fraturados em estudo (capítulo I, pg. 04 e 05). Segundo a representação gráfica (figuras 59 e 60), a validade de correlação, ao longo dos aquíferos fraturados, envolve blocos de amostragem cujo limite mínimo é estabelecido em 0,3km e os limites máximos entre 0,8km, para a direção N25W e 2,5km para a direção N75E. Abaixo ou acima dos valores deste bloco a variância torna-se expressiva, indicando que não se deve realizar correlações entre poços tubulares.

Segundo o mapa de krigagem, as zonas estimadas de maiores vazões (entre 20 a 28 m³/h, com erro associado entre 1,35 a 1,5 m³/h) estão circunscritas aos limites da cidade de Curitiba, nos bairros Mercês, Bom Retiro e a sul do

Boqueirão e Alto Boqueirão, regiões sobre as quais estão traçados expressivos lineamentos estruturais, tanto no mapa de drenagens (figura 19), como nas imagens do MDT (figuras 28, 29 e 30) e em fotografias aéreas.

Destaca-se, ainda, no variograma da figura 59, o efeito buraco, registrado a pulsos regulares, com intervalos definidos a cada 2,5km na direção N20-40W e 5,0km segundo N50-70E. O primeiro intervalo representa o ponto de estrangulamento do aquífero e ocorre perpendicularmente às intrusões de diques básicos. O segundo intervalo está alinhado com o *trend* geral dos aquíferos.

A análise variográfica é corroborada com a verificação do efeito buraco. Os resultados de ambos, coincidem com a disposição das estruturas geológicas, tanto com a direção de lineamentos a norte da cidade, como com as intrusões básicas, que afetam os aquíferos.

O número de dados relativo ao nível potenciométrico, foi suficiente para produzir distribuição do tipo gaussiana. Apesar desta aparente homogeneização de valores, a verificação do efeito deriva, no variograma médio, mostra que este fenômeno está atrelado, não a uma forma de distribuição dos dados, mas ao comportamento da variável, relacionado ao posicionamento espacial do objeto examinado.

Este fenômeno está ligado à existência da Bacia de Curitiba, a qual, por implicar em uma inflexão do substrato, promove desvios naturais sobre as realizações amostrais. Este fenômeno está atenuado sobre as vazões, em função da influência, principalmente, de fatores hidráulicos, o que não acontece com o nível potenciométrico.

Tanto a variografia dos resíduos, como as curvas de contorno da superfície de tendência do nível piezométrico apontam como direção principal os quadrantes NE-SW. O elipsóide, definido para os resíduos, apresenta eixo principal segundo N50E, enquanto o eixo menor se dirige para N40W.

Os variogramas que definem os eixos do elipsóide (figura 70 e tabela 9) confirmam a vinculação dos dados em meio fraturado, estabelecida anteriormente (capítulo I, pg. 04 e 05). As dimensões determinadas do bloco, para o qual as correlações são válidas, apresentam limites mínimo de 0,4km e máximo de 1,6km,

na direção N50E, e variação de 0,4km e 0,8km na direção N40W. Para poços tubulares situados a intervalos menores, ou maiores que os valores obtidos, a correlação não tem validade.

É importante observar que as curvas de contorno do nível piezométrico configuram uma superfície, com uma área baixa central, na cota 875m, e que a partir deste, o fluxo se divide em duas direções: para nordeste, além da futura represa do Iraí, em direção a serra do Mar, e para sudoeste, no sentido da bacia hidrográfica do rio Iguaçu. Esta zona central da superfície piezométrica, quando sobreposta ao mapa geológico, coincide com as porções mais profundas da Bacia de Curitiba, com as curvas de contorno acompanhando o eixo maior da bacia.

Sobre o aluvião do rio Iguaçu, tais curvas (figura 72) estreitam-se rapidamente, sugerindo a existência de um falhamento nesta área.

O comportamento dos dados altimétricos do contato entre os sedimentos da Formação Guabirotuba e o embasamento cristalino apresentam similaridade em relação aos dados de altitude piezométrica, quanto à distribuição de frequência.

Também para esta variável, verificou-se a incidência do efeito deriva. Se isto não ocorresse, poder-se-ia suspeitar da integridade dos valores amostrados, pois para esta variável, este fenômeno tem uma expectativa óbvia.

O comportamento das curvas confirma as observações de superfície, ao se sobrepor com o mapa geológico, destacando-se as relações com os limites das unidades geológicas. Ressalte-se a região determinada pelos valores das curvas e o eixo principal da bacia. O primeiro, forma uma área baixa, na cota 840m, a qual é circunscrita por curvas de valores crescentes que a delimitam, até o ponto em que se dividem, formando dois novos núcleos, um a nordeste, em direção a bacia hidrográfica do rio Ribeira e outro a sudoeste, para a bacia do rio Iguaçu.

Esta configuração ajusta-se ao padrão revelado pelo mapa de tendências do nível potenciométrico, tanto na forma, como na posição espacial.

O formato das curvas de contorno dos contatos entre sedimentos e rocha cristalina ressaltam a geometria, em planta, da Bacia de Curitiba, perfeitamente ajustada ao trend regional, destacado pelo Cinturão Ribeira. Este fato

sugere que os eventos geradores desta bacia sedimentar possuem correspondência com o sistema regional dos estiramentos, apesar desta bacia ser de idade terciário-quaternária.

Os valores das cotas das entradas d'água registradas em poços tubulares, quando variografadas, apresentaram evidente efeito pepita. Mesmo com a retirada de tendências, a análise sobre os resíduos mostrou diversas subpopulações e a persistência do efeito pepita, impedindo operações geoestatísticas.

Este comportamento pode ser entendido facilmente. Considerando-se que na área de pesquisa existem diferenças altimétricas da ordem de 160m, ao se seccionar os aquíferos com perfurações que atingem até 250m de profundidade, pode-se, na computação dos dados, operar-se com amostras de populações distintas, representantes de mais de uma superfície de fluxo subterrâneo.

A seção geológica, da figura 81, ilustra a afirmação acima. Nela, estão correlacionados dados de poços tubulares, onde os registros das entradas d'água encontram-se em posição espacial que permitem inferir a continuidade do conduto e mostram a existência de três horizontes diferentes por onde ocorre o fluxo. Ao se mesclar dados destas superfícies, que eventualmente apresentam parâmetros estatísticos diversos, podem surgir distribuições de frequências que expressem esta mistura, através de subpopulações.

Por este fator, também, se justifica a ocorrência do efeito pepita, na medida em que os dados deixam de ter continuidade espacial, pois cada horizonte investigado pode, eventualmente, obedecer a modelos de comportamento espacial diverso, com parâmetros geoestatísticos distintos.

Um outro fator que impõe incertezas a esta variável refere-se a um aspecto comercial. A profundidade das entradas d'água, geralmente, determina a continuidade da obra e, por extensão, o custo. Não se sabe, especialmente para registros muito antigos, a fidedignidade do valor das profundidades assinaladas, que se encontram muito próximas ao término de perfurações acima de 150m. Para evitar ambiguidades, os poços que não tiveram sua construção acompanhada e que registraram mais de um valor para as entradas d'água, tiveram desprezado o

registro localizado muito próximo ao final da perfuração. Ainda assim, há que se suspeitar, pelo aspecto comercial, de um ou outro dado não estar registrado na cota verdadeiramente correta.

Apesar dos problemas relacionados com esta variável, as curvas de contorno, geradas e o método de análise de tendências, apresentaram resultados coerentes com as anteriores. Os níveis mais elevados das entradas d'água localizam-se a norte-noroeste e a sudeste da área. A superfície delimita uma região de valores baixos no centro da área, de forma a configurar uma calha que ruma para nordeste, de um lado, infletindo-se para sul, no outro extremo. Esta região central, também indicada nos mapas anteriores, ajusta-se com a calha da Bacia de Curitiba.

O resultado satisfatório, apesar dos problemas relacionados a incerteza dos registros desta variável e das subpopulações existentes, mostra que aos diversos horizontes indevidamente agrupados, apresentam tendência média concordante com um *trend* determinado.

Enquanto as superfícies potenciométrica e das entradas d'água apresentam o comportamento hipotético do fluxo d'água sob pressão e a continuidade física atual, do fluxo subterrâneo, respectivamente, o mapa de isóbatas completa o quadro principal do funcionamento dos sistemas aquíferos, apresentando a espessura de capeamento existente entre a superfície piezométrica e a superfície do terreno.

É fácil deduzir que o último mapa revela, de forma sumariada, as principais entradas e saídas do sistema, pois onde estão assinaladas as menores espessuras de cobertura, mais próximo das áreas de recarga se estará e vice-versa.

O mapa de isóbatas indica menores espessuras de cobertura sobre o nível piezométrico, a norte da área e também a sudeste e a oeste. A oeste, temos a região do rio Passaúna, que pela diminuta espessura da cobertura, ao longo de toda a drenagem, provoca esta diminuição nos valores das curvas, fato que se repete a sudeste, sobre o rio Iguaçu. As maiores espessuras, indicativas do escoamento do fluxo em direção à saída do sistema, mostram coincidência com a

calha da Bacia de Curitiba. Também neste caso, separando o fluxo para nordeste e para sudoeste.

Observa-se, ainda, uma zona de espessamento da cobertura a noroeste, em que as curvas formam um núcleo sobre a porção setentrional do aluvião associado ao rio Passaúna. É importante observar, também, que sobre esta área estão traçados lineamentos, na direção NE-SW, tanto em fotos-aéreas (figura 20), como no MDT (figura 28).

O modelo digital de terreno demonstra, de modo mais nítido que em fotografias-aéreas, a estruturação do relevo e apresenta ainda, uma vantagem adicional: pode receber iluminação de posições variadas e revelar contornos, indivisíveis à luz natural.

Feições como o lineamento sobre a depressão onde se encaixa o rio Barigui; o alinhamento do canal do rio Iguaçu e as cristas sustentadas por intrusivas básicas, são destacadas no modelo digital de terreno.

A iluminação no sentido NE-SW destaca os diques de diabásio (figura 28) e na direção NW-SE ressalta o *trend* NE, predominante na área. Destaca-se, também, traços E-W, os quais podem representar lineamentos, ainda não devidamente interpretados.

O emprego de modelos digitais para revelar estruturas de relevo, representa uma alternativa importante na pesquisa geológica, especialmente para áreas densamente urbanizadas, onde o recobrimento pelas edificações acrescenta dificuldades adicionais ao reconhecimento geológico.

As técnicas geoquímicas, empregadas neste trabalho, tinham como objetivo principal revelar diferenças entre a composição das águas das lentes de arcósios da Formação Guabirota e das fraturas do embasamento cristalino. Os diagramas de Piper e de Khorzinskii, não foram suficientes para tanto, mas demonstraram outras particularidades importantes dos aquíferos.

As águas dos aquíferos cársticos definem um fácies hidroquímico, facilmente identificável. Agrupam-se na extremidade bicarbonatada cálcica, no diagrama de Piper (figura 81) e na zona da caolinita no diagrama de Khorzinskii (figura 82).

As águas das lentes arcossianas tendem ao pólo bicarbonatado sódico do diagrama de Piper e concentram-se na zona da montmorilonita, no diagrama de Khorzinskii.

As águas dos aquíferos fraturados mostram comportamento intermediário e representam intercomunicação entre aquíferos, situando-se entre os dois fácies anteriores, com tendência maior para o comportamento hidroquímico das águas das lentes arcossianas.

O panorama expresso pelos gráficos reforça as observações realizadas sobre as variáveis relacionadas diretamente com o fluxo subterrâneo. Se as zonas de recarga estão situadas a norte da área, onde se localizam os aquíferos cársticos, aquelas devem, então, ser as águas com menor grau de mistura entre aquíferos e, por isto, individualizam claramente um fácies hidroquímico, em função dos elevados teores de Ca^{++} , Mg^{++} e HCO_3^- , dissolvido das paredes dos aquíferos.

As águas das lentes de arcósios, por outro lado, recebem recarga superficial e apresentam-se menos susceptíveis a influências do aquífero cárstico, por se situarem próximas a superfície do terreno, revelando um fácies hidrogeoquímico. Entretanto, em função do número reduzido de análises químicas, a delimitação deste fácies tornou-se dificultada. O enriquecimento em Na^+ e a tendência a produtos intempéricos bissialitizados, é reflexo da composição das argilas montmoriloníticas (Fortin, 1989), que circundam as lentes arcossianas. Isto indica que parte da recarga das lentes de arcósios provém da lenta transmissão de água das argilas.

As águas dos aquíferos fraturados das rochas gnáissico-migmatíticas, por estarem situadas diretamente abaixo da cobertura dos sedimentos arcossianos, revelam comportamento parcialmente similar ao das águas dos arcósios, o que pode sugerir que as águas superficiais infiltram-se pelos sedimentos argilosos da Formação Guabirotuba até encontrar fraturas do embasamento, migrando por elas e alimentando os aquíferos em rocha cristalinas.

Por outro lado, os aquíferos fraturados, por se situarem nas menores cotas altimétricas registradas em profundidade e, especialmente, por representarem sistemas de descontinuidades, parecem receber maior influência de águas

carbonatadas, pois apesar da composição predominantemente silicática das rochas cristalinas, diversos resultados analíticos aproximam-se do pólo bicarbonatado-cálcico.

Há, ainda, dois outros indícios de enriquecimento das águas dos aquíferos fraturados por íons bicarbonatados: amostras de paredes de fraturas, atravessadas durante perfurações de poços tubulares, revelam a presença de cristais de carbonatos. Associado a este fato, diversos poços tubulares passam a apresentar, no decorrer do tempo, redução da capacidade específica. Uma operação, bastante difundida comercialmente, de recuperação, consiste na aplicação de produtos químicos, com vistas a rebaixar o pH das águas existentes no poço. Estas operações tem se mostrado bastante eficientes (Marco A. Fontana, 1996, comunicação pessoal), significando que o teor de bicarbonato, nestas águas de rochas silicáticas, é tal, que as mudanças naquele sistema hidrogeológico, através da perfuração dos poços e bombeamento, é suficiente para promover a precipitação de cristais de carbonato, os quais passam, gradualmente a obstruir os condutos das fraturas.

As curvas de contorno das distribuições dos íons maiores apresentam formas que mostram forte semelhança com as demais variáveis vetorizadas. A distribuição dos íons Na^+ , K^+ , Ca^{++} e HCO_3^- , delimitam uma superfície na qual o formato geral apresenta alongamento no sentido N-S e NE-SW e que o eixo principal das curvas superpõem-se de maneira aproximadamente concordante com o eixo maior da Bacia de Curitiba. As concentrações dos íons indicam que o fluxo obedece a uma divisão na parte média dos conjuntos, desenvolvendo-se, para S-SW e N-NE. Especialmente, na distribuição do íon HCO_3^- , o formato das curvas concorda totalmente com o padrão obtido pelas variáveis anteriores.

Os resultados gravimétricos, tabulados e examinados por geoestatística apresentam, quanto à distribuição e continuidade, as maiores irregularidades entre as variáveis examinadas. A ocorrência de subpopulações parece ser uma característica intrínseca da variável. Outro fator é a ocorrência persistente do efeito deriva, o qual incide, permanentemente, mesmo quando se realizam operações de desagrupamento, limitação de áreas, etc.

As curvas de contorno, realizadas por superfícies de tendência, ajustam-se perfeitamente à disposição da Bacia de Curitiba, concordando, inclusive, com o padrão de fluxo dos mapas anteriores. Neste caso, também ocorre diferenciação das curvas em dois setores. Registra-se variações de densidades, segundo o eixo principal da bacia, evoluindo para o extremo sudoeste da área e para o outro extremo, nordeste.

No mapa de krigagem dos resíduos (figura 56), somado à tendência, foram interpretados alinhamentos gravimétricos, os quais apontam principalmente para NE-SW e N-S.

Outro aspecto importante registrado na análise estrutural dos dados gravimétricos, refere-se ao efeito buraco. Assim, o registro se faz de forma repetitiva semelhante aos dados de vazões. Este fenômeno, como já mencionado, demonstra interrupção da continuidade dos dados gravimétricos e, possivelmente, é devido à resposta gravimétrica obtida sobre os diques de diabásio.

Os resultados obtidos dão consistência aos dados gravimétricos coletados, uma vez que encontram justificação com os registros geológicos e de superfície, apesar do comportamento estatístico irregular das anomalias Bouguer registradas.

Os alinhamentos traçados sobre fotografias-aérea (figura 20) mostram as diferenças de padrões estruturais, na área. A norte, fora dos limites da cidade, predominam lineamentos de direção NE-SW, seccionados por traços NW-SE. Em superfície, estas feições são produzidas pela geometria dos metassedimentos proterozóicos intrudidos por diques básicos.

No restante da área, destacam-se lineamentos noroeste, representados por diques básicos. Com menor intensidade, observam-se direções N-S e NE-SW. Associados a estes lineamentos, encontram-se encaixadas as principais drenagens da área (figura 19). Ressalta-se, especialmente, as direções N-S, onde estão encaixados os rios Barigui, Palmital, parte do rio Atuba e parte dos rios Passaúna e Belém; no sentido NE-SW, estão alinhados o rio Iguaçu e a parte norte do rio Passaúna e do rio Iraí. Na direção NW, estão dispostos os rios Belém e parte do rio Atuba.

Os destaques dos lineamentos em fotografias aéreas de lineamentos NW-SE, ocorre pelo mesmo motivo no MDT. A posição da fonte iluminadora ressaltará sempre estruturas perpendiculares à iluminação. Como a luz solar percorre a superfície, aproximadamente no sentido leste-oeste, melhor se destacam as estruturas noroeste.

Se considerarmos que muitos destes alinhamentos estão associados a direções de estruturas proterozóicas, como as direções NE-SW, estas deveriam desaparecer com a implantação da Bacia de Curitiba, fato que não ocorre, conforme se observa na distribuição dos traços das drenagens. O que sugere um contínuo desenvolvimento destas estruturas, mesmo após a deposição de sedimentos terciário-quaternários.

A influência de estruturas tectônicas pré deposição dos sedimentos da Bacia de Curitiba, está parcialmente confirmada, na bacia do rio Iraí, para aquíferos das lentes arcossianas da Formação Guabirotuba onde, alinhado a um *graben*, distribuem-se as maiores vazões daquela área (Rosa Fº et al. 1996).

Os mapas produzidos, de distribuição das variáveis examinadas, concordam entre si e ressaltam a importância sobre a localização espacial, forma e ocorrência dos aquíferos, assim como do fluxo subterrâneo, de estruturas tectônicas como a Bacia de Curitiba, as intrusivas básicas e as discontinuidades associadas ao trend regional de estiramentos NE-SW, do qual o cinturão Ribeira faz parte.

A associação entre estas entidades e o padrão de fluxo subterrâneo revelado permitem conceber um modelo genérico de funcionamento destes sistemas (figura 89).

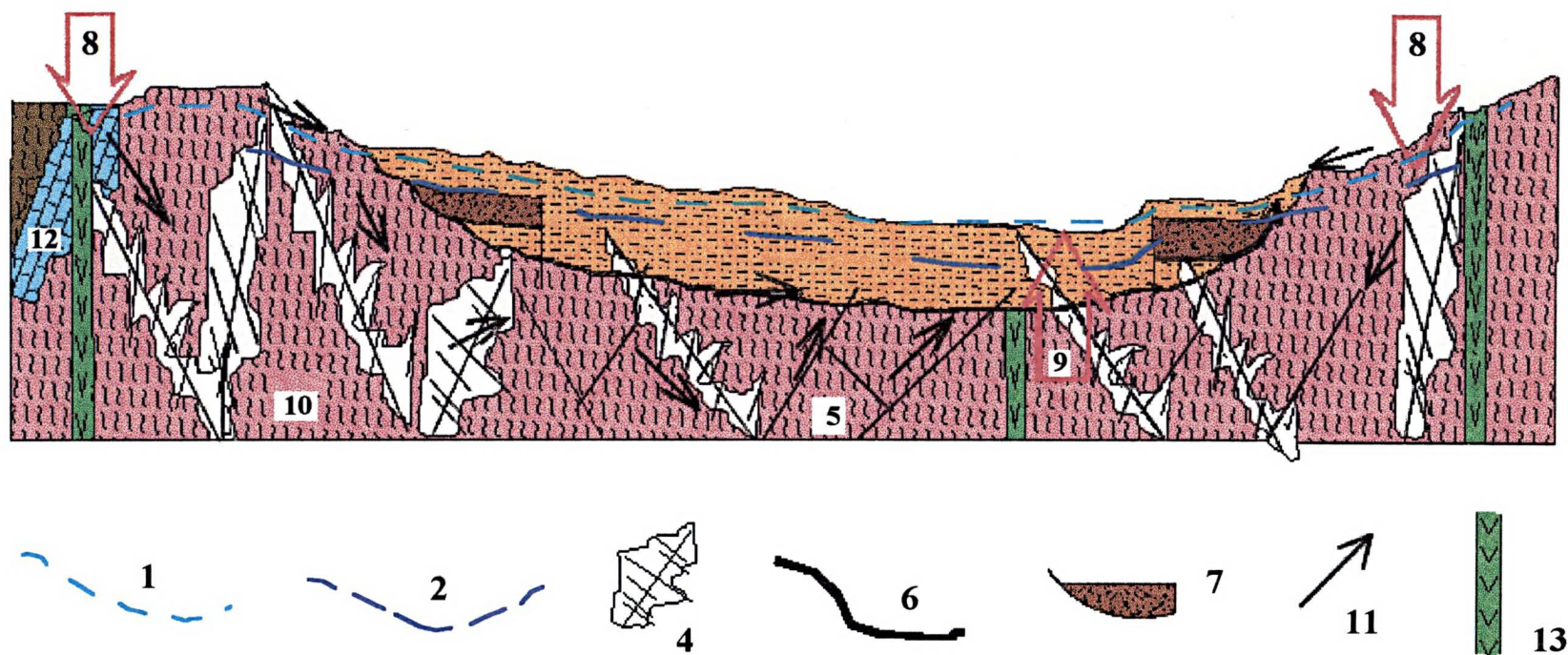


Figura 89 - Representação genérica dos principais elementos dos sistemas aquíferos da Bacia Hidrogeológica de Curitiba: (1) nível freático; (2) nível potenciométrico; (3) aquícluído representado pela cobertura sedimentar; (4) zona de aquíferos fraturados; (5) conexão entre fraturas; (6) conexão entre descontinuidades; (7) aquíferos de lentes de arcósios; (8) zona de recarga; (9) zona de descarga; (10) embasamento cristalino; (11) fluxo d'água; (12) conexão com o sistema aquífero cárstico; (13) diques de diabásio.

Alguns aspectos sobre as entidades envolvidas adicionam consistência aos resultados obtidos. As diferenças altimétricas na área, em direção a bacia do rio Iguaçu (figura 8), geram gradiente hidráulico que concordam com a movimentação subterrânea encontrada. O rio Ribeira que controla a segunda bacia hidrográfica mais importante da região, encontra-se na cota altimétrica 400m, muito abaixo da verificada na área de pesquisa, onde o limite inferior não decresce mais que 840m. Esta diferença de gradientes justificam as tendências de descarga do fluxo subterrâneo para nordeste, verificada em diversos mapas de contorno.

A estruturação geológica e a associação de feições geotectônicas às litologias do Cinturão Ribeira (figura 2), bem como a proximidade da Serra do Mar, igualmente marcada por processos tectônicos, configuram um panorama em que dificilmente se poderia imaginar, na área em estudo, aquíferos isentos da influência dos controles estruturais reconhecidos na região, os quais ainda carecem de maiores estudos.

9 - CONCLUSÕES

A distribuição das variáveis examinadas e dos lineamentos reconhecidos, tanto em superfície como no MDT, apontam para a existência de controles estruturais dos aquíferos estudados. A entidade geológica, responsável pelo domínio preponderante sobre o fluxo subterrâneo, é a estrutura tectônica representada pela Bacia de Curitiba, que configura a Bacia Hidrogeológica de Curitiba.

Todos os mapas vetorizados e rasterizados, produzidos, corroboram a afirmação acima. Apesar dos aquíferos em exploração, serem, majoritariamente, do tipo fraturados em rochas cristalinas, estes se interconectam em função do controle tectônico, permitindo que o fluxo ocorra ao longo do substrato.

O padrão, expresso pelas linhas de fluxo, envolve entradas via precipitação pluviométrica, com infiltração no solo até atingir os aquíferos. Esta alimentação abrange não apenas a recarga direta de água superficial, como uma dinâmica de troca entre os aquíferos. O conjunto de sistemas apresenta recarga ligada, em parte, aos aquíferos cársticos e de outra parte, aos sistemas próximos a Serra do Mar. Este complexo apresenta, independente dos aquíferos que percorre, uma rota preferencial centrada na estrutura tectônica que delimita a Bacia de Curitiba. As descargas apontam para duas bacias hidrográficas principais: Iguaçu e Ribeira. É curioso observar, entretanto, que o divisor de águas subterrâneo entre as duas bacias não coincide com a divisão em superfície. O primeiro encontra-se em área drenada pelo rio Iguaçu.

As dificuldades da execução de trabalhos de pesquisa geológica, em áreas densamente urbanizadas, em relação à restrição do uso de métodos indiretos de investigação e também de observações diretas devido às edificações, foram satisfatoriamente contornadas com o emprego do modelo digital de terreno. A comparação entre os lineamentos reconhecidos no MDT e em fotografias-aérea, ressaltam a confiabilidade do modelo.

Os resultados obtidos com a aplicação de geoestatística e com análise de superfície de tendência, mostraram-se bastante satisfatórios, pois os resultados

encontram sustentação no conhecimento geológico e em observações diretas sobre as entidades examinadas.

Os resultados obtidos e o modelo gerado de funcionamento dos sistemas, deverá contribuir para a elaboração de projetos de planejamentos e controle do aproveitamento da água subterrânea em Curitiba. Estes, necessitarão de trabalhos subsequentes que dividam a área da cidade em função das estruturas reconhecidas. Deve-se, então, operar a modelização do fluxo subterrâneo compartimentado dentro do sistema maior, dominado pela estrutura tectônica reconhecida pela Bacia de Curitiba. Desta forma, poderão ser realizadas estimativas sobre a saturação dos aquíferos, em relação a demanda exigida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SÁBER, A.N.; BIGARELLA, J.J. 1961 - **Superfícies aplainadas do Primeiro Planalto do Paraná**. Bol. Paranaense de Geografia, UFPR - Curitiba-PR, 4/5, pg. 116-125.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1990. **Construção de poços para captação de água subterrânea**. NB 1290, 12pg.
- ARC/INFO. 1991. ARC/INFO User's Guide - **Surface Modelling with TIN™**. Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands, USA, version 6.0, 233p .
- BIGARELLA, J.J. e MOUSINHO, M.R. 1965 - **Considerações a respeito dos terraços fluviais, rampas de colúvio e várzeas**. Bol. Paranaense de Geografia, UFPR - Curitiba-PR, 16/17, pg. 153-197.
- BIGARELLA, J.J., SALAMUNI R. e AB'SÁBER, A.N. 1961. **Origem e ambiente de deposição da bacia de Curitiba**. Bol. Paran. Geogr., 4-5, p. 71-81.
- BIGARELLA, J.J.; MOUSINHO, M.R. e SILVA, J.X. da. 1965 - **Pediplanos, pedimentos e seus depósitos correlativos no Brasil**. Bol. Paranaense de Geografia, UFPR - Curitiba-PR, 16/17, pg. 117-151.
- BIGARELLA, J.J.; SALAMUNI, R. e AB'SÁBER, A.N. 1961 - **Origem e ambiente de deposição da Bacia de Curitiba**. Bol. Paranaense de Geografia, UFPR - Curitiba-PR, 4/5, pg. 71-81.
- BLACK, J.H. & BRIGHTMAN, M.A. Conceptual model of the hydrogeology of Sellafield. The Quarterly Journal of Engineering Geology, The Geological Society, v.29, p.83.
- CANALI, N.C. e MURATORI, A.M. 1981 - **Síntese da evolução geomorfológica da bacia sedimentar de Curitiba**. 3º Simpósio Regional de Geologia. Curitiba/PR, vol.2, pg. 363-371.
- CANALI, N.C.; PASSOS, E. e COSTA, T.M. 1981 - **Contribuição da geomorfologia no planejamento da região metropolitana de Curitiba**. 3º Simpósio Regional de Geologia. Curitiba/PR, vol.2, pg. 355-362.

- CASTANY, G. 1971. **Tratado practico de las aguas subterraneas**. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, 671 pg.
- CEHPAR, 1994 - Projeto HG-64. **Avaliação do potencial hídrico da região metropolitana de Curitiba**. Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza, UFPr, Curitiba/PR.
- CHANG, H.K.; KOWSMANN, R.O. e FIGUEIREDO, A.M.F. 1990. **Novos conceitos sobre o desenvolvimento das bacias marginais do leste brasileiro**. In.: Origem e evolução de Bacias Sedimentares - PETROBRÁS. Rio de Janeiro, pg. 269-289.
- CINTRA, J.P. 1990. **Modelos Digitais de Terreno**. Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento. POLI - USP. Universidade de São Paulo, pg.53-65.
- COMEC. 1976. **Região Metropolitana de Curitiba, Levantamento Aerofotogramétrico, Esc. 1:20.000**. Sistema Estadual de Planejamento. Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba. Curitiba, PR.
- COMEC. Inédito. **Região Metropolitana de Curitiba, Esc. 1:50.000**. Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba. Curitiba, PR.
- COMEC. 1995. **Região Metropolitana de Curitiba, Esc. 1:150.000**. Governo do Estado do Paraná, Secretaria de Estado do Planejamento e Coordenação Geral. Curitiba, PR.
- COMEC, 1996. PRA-01. **Parque e Controle das Cheias do Alto Iguaçu**. Relatório interno. Curitiba, PR.
- CPRM. 1988. Projeto Integração Geológica da Região Metropolitana de Curitiba. São Paulo: CPRM. Mapa Geológico Compilado, Esc.: 1:50.000.
- CUSTODIO, E. e LLAMAS, M.R. 1983. **Hidrologia Subterránea**. 2.ed., Barcelona: Omega, vol.1.
- DAVIS Jr., C.A. e BORGES, K.A. de V. 1995. **GIS Orientado a Objetos: Teoria e Prática**. FATOR GIS, SAGRES Editora, Curitiba-Pr, nº 09, pg. 31-34.
- DOMENICO, P.A. & SCHWARTZ, F.W. 1990. **Physical and Chemical Hydrogeology**. John Wiley & Sons, 824p.

- FONTANA, R.A. 1988 - **Os terraços fluviais na Bacia do Rio Passaúna (PR) e suas relações cronoestratigráficas e arqueológicas**. Monografia Curso de Geografia, Departamento de Geografia UFPR-Curitiba/PR, 110pg.
- FORTIN, P. 1989 - **Mobilisation, fractionnement et accumulation des terres rares lors de l'altération latéritique de sédiments argilo-sableux du bassin de Curitiba (Brésil)**. Ecole des Mines de Paris. Mémoires des Sciences de La Terre, nº10, Fontainebleau, 187p.
- FULFARO, V.J. 1971. **A evolução tectônica e paleogeográfica da Bacia Sedimentar do Paraná pelo "Trend Surface Analysis"**. USP. Escola de Engenharia de São Carlos. EESCUSP, Geologia nº14, 110 pg.
- GEO-EAS. 1988. **Geostatistical Environmental Assessment** Software. U.S. Environmental Protection Agency. Las Vegas, Nevada, USA.
- GIUSTI, D.A. 1989. **Contribuição a geologia ambiental no município de Curitiba-PR**. Dissertação (mestrado) USP - 115p.
- GEMAEL, C. e DOUBEK, A. 1975. **Levantamento gravimétrico do município de Curitiba**. Bol. Univ. Fed. Paraná, Geodésia, nº17.
- GS-LIB. 1993. **Geostatistics Software Library**, version 1.4. Stanford Center for Reservoir Forecasting School of Earth Sciences Stanford, CA.
- ITCF - Instituto de Terras e Cartografia. 1987. **Atlas do Estado do Paraná**. Gov. Est. Pr, Secr. Est. Agricultura e do Abastecimento. Curitiba, PR, 74pg.
- IPPUC. 1992. **Curitiba Planta Preliminar de Arruamento, Esc. 1:20.000**. Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba.
- INDÚSTRIA & COMÉRCIO. 06/08/97. **RMC tem maior crescimento populacional do País**. Pg. B1.
- JOURNEL, A.G. e HUIJBREGTS, Ch.J. 1978. **Mining Geostatistics**. Academic Press, London, 600 pg.
- LANDIM, P.M.B. 1985. **Introdução à Geoestatística**. Rio Claro-SP. Publicação Didática nº 02.
- LISBOA, A.A. e BONACIM, E.A. 1995. **Sistema aquífero cárstico**. SANARE, vol.4, nº4, pg.26 a 30.

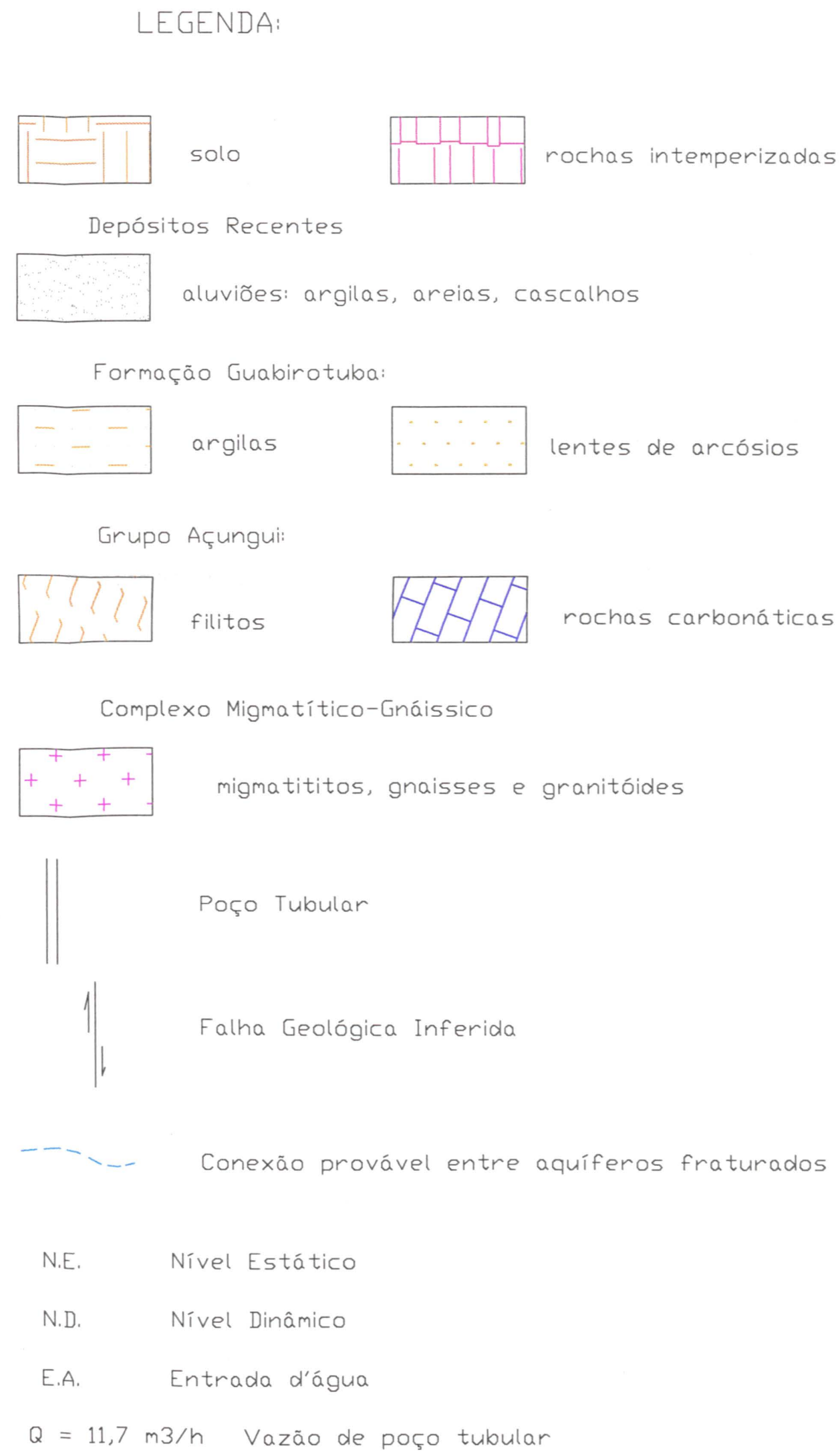
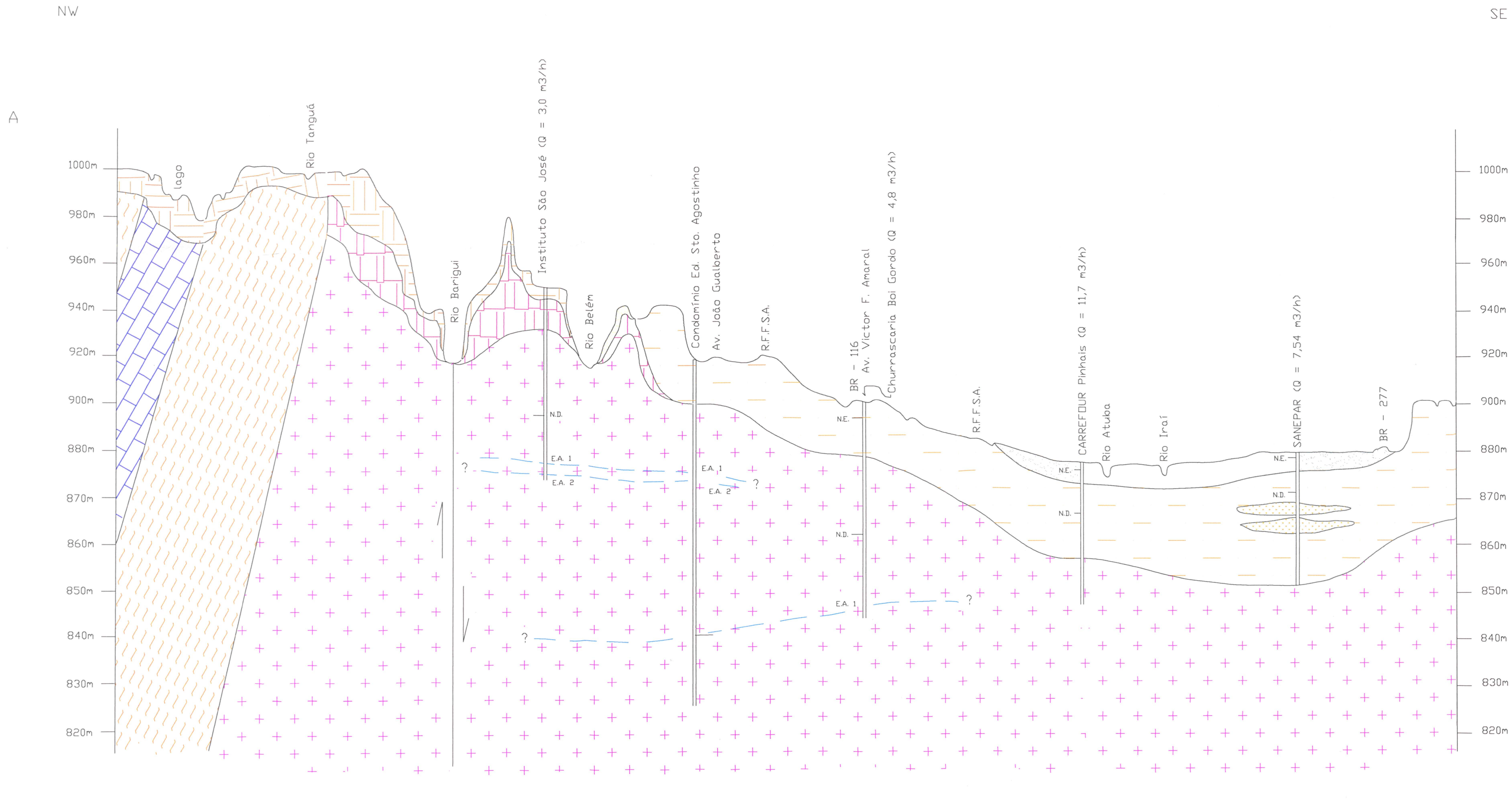
- LITTLEBOY, A. 1996. **The geology and hydrogeology of the Sellafield area: development of the way forward**. The Quarterly Journal of Engineering Geology, The Geological Society, v.29, p.95.
- MACEDO, J.M. 1990. **Evolução tectônica da Bacia de Santos e áreas continentais adjacentes**. In.: Origem e evolução de Bacias Sedimentares - PETROBRÁS. Rio de Janeiro, pg. 361-376.
- MARBLE, D.F. e PEUQUET, D.J. 1983. **Geographic Information Systems and Remote Sensing**. Manual of Remote Sensing, 2nd ed. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Bethesda, Md.
- MELO, M.S.; RICOMINI, C.; HASUI, V.; ALMEIDA, F.F.M. de, e COIMBRA, A.M. 1985. **Geologia e evolução do sistema de bacias tafrogênicas continentais do sudeste do Brasil**. Revista Brasileira de Geociências, 15 (3): 193-201.
- MURATORI, A.M.; GIUSTI, D.A.; CANALI, N.E. 1982. **Interpretação gravimétrica preliminar da configuração topográfica do embasamento cristalino no município de Curitiba**. Congresso Brasileiro de Geologia, Anais... Congr.Bras.Geol., XXXII, Salvador, BA, V.4, p.1576-1580.
- NOGUEIRA Fº, J.; BITTENCOURT, A.V.L. 1995. **Caracterização hidroquímica e implicações ambientais dos aquíferos da região de Curitiba**. Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia VI. Encontro de Geologia do Cone Sul, I, Boletim de Resumos Expandidos, Porto Alegre - RS, p.371-374.
- NOGUEIRA Fº, J.; LISBOA A.A.; ROSA Fº, E.F. 1996(a). **Estudos preliminares sobre tendências de fluxo subterrâneo da bacia hidrográfica do Alto Iguaçu -Curitiba/Pr**. IX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Salvador-BA, ABAS.
- NOGUEIRA Fº, J.; QUINTAS, M.; SOARES, P.C.; SALAMUNI, E. 1996(a). **Modelagem gravimétrica para o reconhecimento de estruturas geológicas na região de Curitiba**. XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia. Anais.... Vol. 7, pg. 149-152.
- NOGUEIRA Fº, J.; SOARES, P.C. 1996. **Análise da distribuição da água subterrânea em Curitiba através de geoprocessamento**. II Congresso e Feira para Usuários de Geoprocessamento. Anais... SAGRES, Curitiba-PR, p.261-272.

- NOGUEIRA F^o, J.; SOARES, P.C. 1997. **Recharge and discharge of aquifer systems in Curitiba, Brazil**. XXVII IAH Congress on Groundwater in the Urban Environment. **Proceedings...** Nottingham, UK, Edited by John Chilton et al. A.A.BALKEMA, p.319-324.
- PARKER, H.D. 1990. The 1990 **GIS SOURCEBOOK**. Colorado, USA, pg. 01-05.
- PATTON, F.D. e HENDRON, A.J., Jr. 1974. **General report on mass movements**. Second Internat. Congress, São Paulo, Brasil, Proc.: Internat. Assoc. Eng. Geol., v.2.
- QUINTANILHA, J.A. 1990. **Processamento de Imagens Digitais**. Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento. POLI - USP. Universidade de São Paulo, pg.37-52.
- ROCHA, A.L. 1996 **Caracterização ambiental, hidrogeológica e geoquímica dos depósitos aluvionares da bacia hidrográfica do rio Pequeno, região metropolitana de Curitiba-PR**. Dissertação de mestrado, UFPR, Curitiba/PR, 160pg.
- ROCKWARE. RockWare Incorporated - Golden, Co 80401 USA
- RODRIGUES, M. 1990. **Introdução ao Geoprocessamento**. Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento. POLI - USP. Universidade de São Paulo, pg.01-26.
- RODRIGUES, M. 1993. **Geoprocessamento: Um Retrato Atual**. FATOR GIS, SAGRES Editora, Curitiba-Pr, nº 02, pg. 20-23.
- RODRIGUES, M. 1994. **A modelagem de Dados Espaciais**. FATOR GIS, SAGRES Editora, Curitiba-Pr, nº 05, pg. 39-40.
- ROSA F^o, E.F. da; PARANHOS F^o, A. C.; PRAZERES F^o, H. J. DOS e VALASKI, Z. F. 1996. **Considerações sobre aspectos físicos e hidráulicos da Formação Guabirotuba na região nordeste de Curitiba**. Bol. Paranaense de Geologia, n.44, UFPr, Curitiba/Pr.
- SALAMUNI, R. 1981 - **Geologia da água subterrânea na região metropolitana de Curitiba**. 3º Simpósio Regional de Geologia. Curitiba/PR, vol.2, pg. 372-381.
- SOARES, P.C.; BARCELLOS, P.E.; CSORDAS, S.M.; 1983. **Análise Morfoestrutural integrada em imagens de radar e Landsat na Bacia do Paraná**. Relatório RT 041/81, Paulipetro.

- SOARES, P.C. 1992. **Tectônica sinsedimentar cíclica na Bacia do Paraná - Controles**. Tese Professor Titular, Departamento de Geologia, UFPR, 131pg.
- STARR, L.E. 1990. **Digital Cartographic Data Products and Activities of the U.S.** Geological Survey. The 1990 GIS SOURCEBOOK. Colorado, USA, pg 317-319.
- STRAHLER, A.N. 1970 - **Introduction to physical geography**. John Wiley & Sons, USA, 457 pg.
- SURFER. **Surface Mapping System** - Golden Software Inc. USA
- TARDY, Y. 1970. **Characterization of the principal weathering types by the geochemistry of waters from some european and african crystalline massifs**. Chemical Geology. Elsevier Pub. Company, nº 7, pg.253-271.
- THEODOROVICZ, A. 1994. **Projeto Curitiba. Informações básicas sobre o meio físico**: Subsídios para o planejamento territorial. Folha de Curitiba, 1:100.000. Curitiba: CPRM, 1994.

ANEXO 1

SEÇÃO GEOLÓGICA AA'



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ – UFPR			
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA		CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA	
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:		GEOLOGIA EXPLORATÓRIA	
Título da Dissertação:			
A BACIA HIDROGEOLÓGICA DE CURITIBA			
Local:	Estado:	HORIZONTAL	VERTICAL
CURITIBA	PARANÁ	ESCALAS: 1 : 50.000	1 : 1.000
SEÇÃO GEOLÓGICA AA'			
Mestrando:			Data:
JOAO NOGUEIRA FILHO			1997

ANEXO 2

SEÇÃO GEOLÓGICA BB'

SW

Divisor de águas entre as Bacias Hidrográficas

Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu

Bacia Hidrográfica do Rio Ribeira do Iguaçu

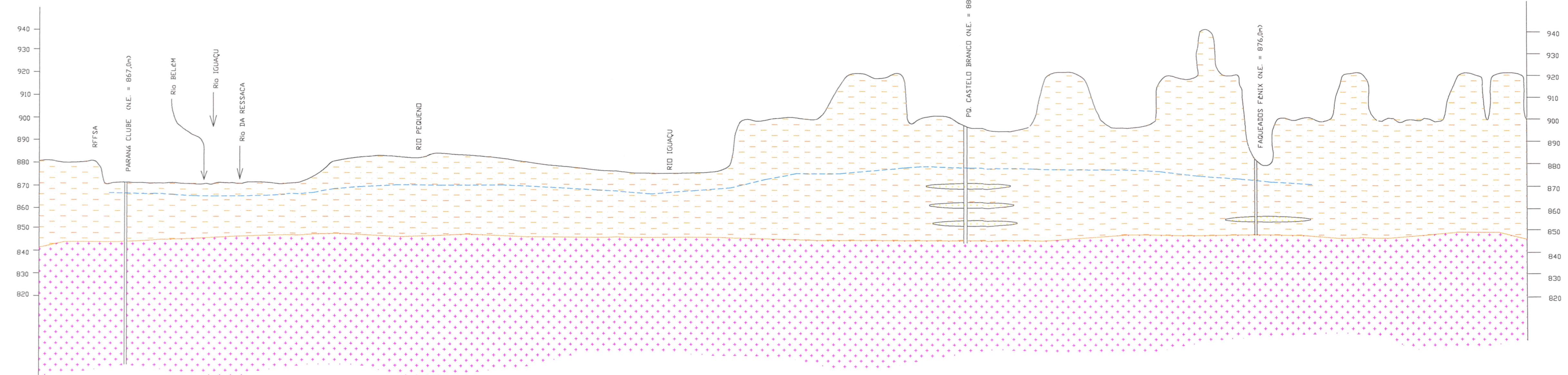
NE

B

B'

(m)

(m)



LEGENDA:

Formação Guabirotuba:

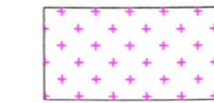


argilas



lentes de arcósios

Complexo Migmatítico-Gnáissico



migmatitos, gnaisses e granitóides



Poço Tubular



Continuidade Hipotética da Superfície Potenciométrica

N.E.

Nível Estático

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ – UFPR

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:

GEOLOGIA EXPLORATÓRIA

Título da Dissertação:

A BACIA HIDROGEOLOGICA DE CURITIBA

Local:

Estado:

HORIZONTAL

VERTICAL

CURITIBA

PARANÁ

ESCALAS:

1 : 50.000

1 : 1.000

SEÇÃO GEOLÓGICA BB'

Mestrando:

JOAO NOGUEIRA FILHO

Data:

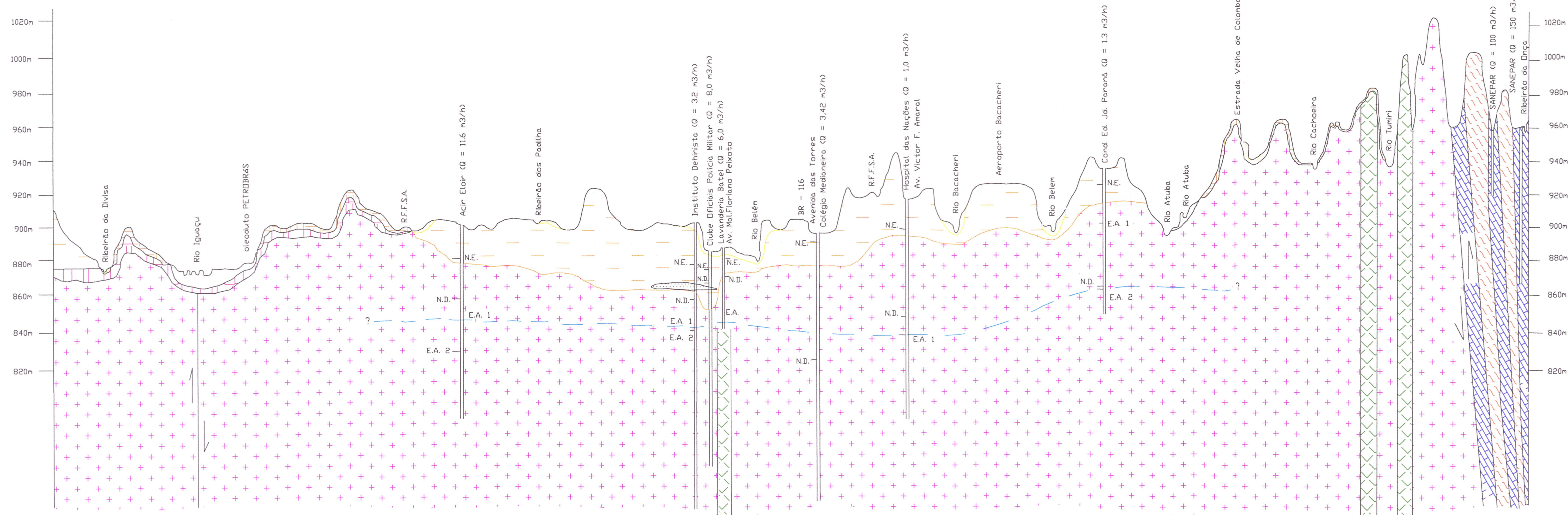
1997

ANEXO 3

SEÇÃO GEOLÓGICA CC'

SW

C

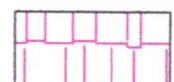


LEGENDA:

NE

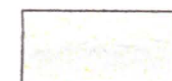


solo



rochas intemperizadas

Depósitos Recentes



aluviões: argilas, areias, cascalhos

Formação Guabirotuba:



argilas



lentes de arcósios

Formação Serra Geral

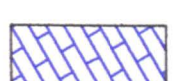


Dique de diabásio

Grupo Açungui:

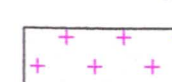


filitos



rochas carbonáticas

Complexo Migmatítico-Gnáissico



migmatitos, gnaisses e granitóides

Falha Geológica Inferida



Poço Tubular



Conexão provável entre aquíferos fraturados

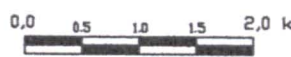


N.E. Nível Estático

N.D. Nível Dinâmico

E.A. Entrada d'água

Q = 8,0 m³/h Vazão de poço tubular

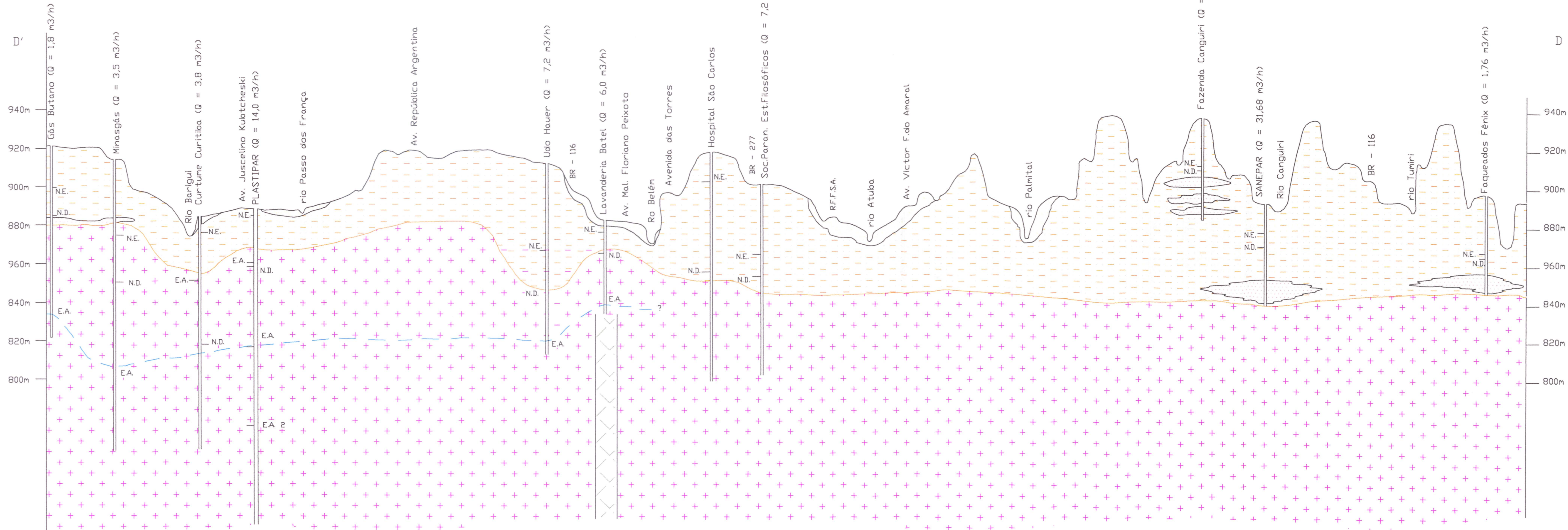


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ – UFPR				
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA		CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA		
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:		GEOLOGIA EXPLORATÓRIA		
Título da Dissertação:				
A BACIA HIDROGEOLÓGICA DE CURITIBA				
Local:	Estado:	ESCALAS:	HORIZONTAL	VERTICAL
CURITIBA	PARANÁ		1 : 50.000	1 : 1.000
SEÇÃO GEOLÓGICA CC'				
Mestrando:				Data:
JOAO NOGUEIRA FILHO				1997

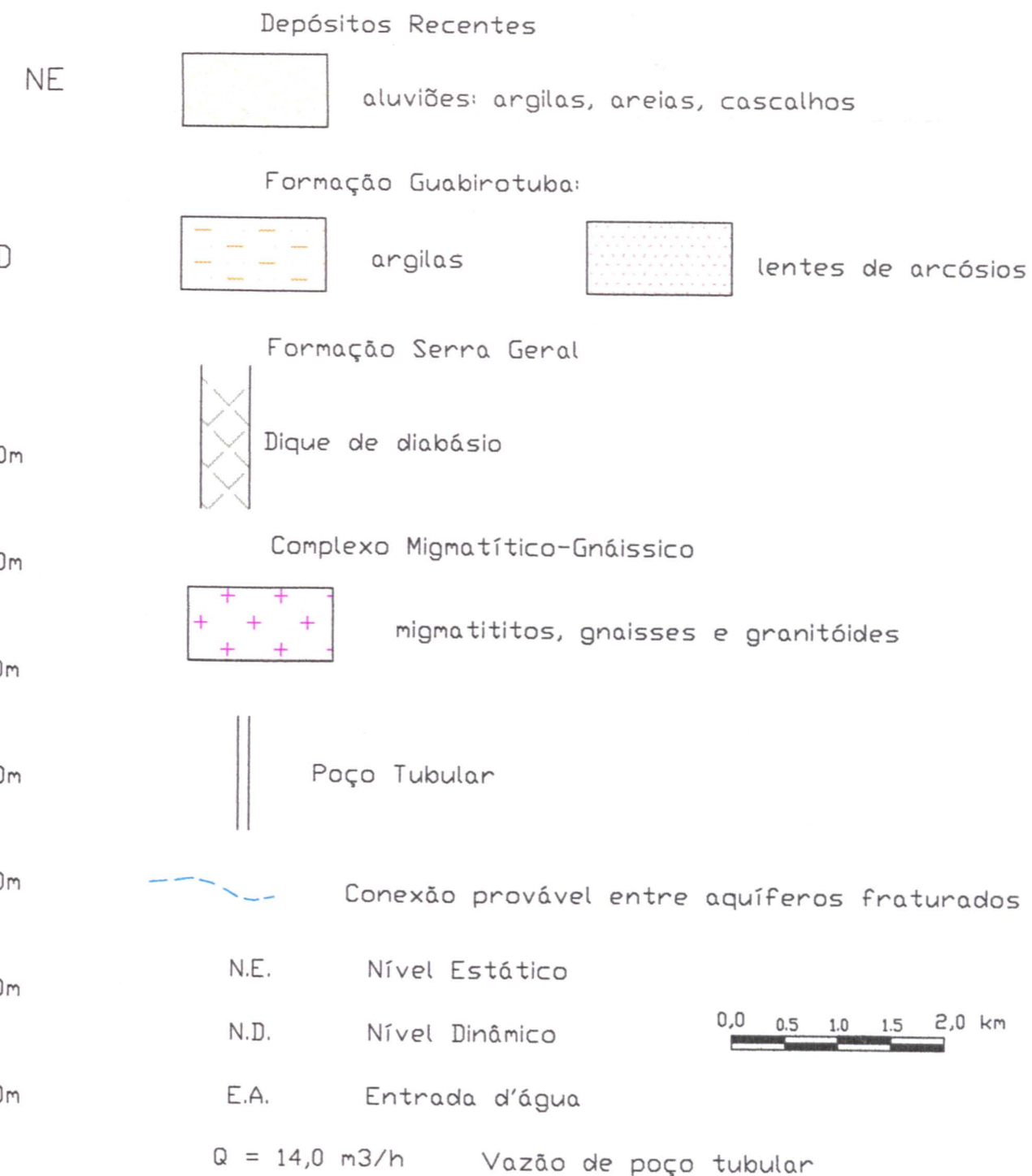
ANEXO 4

SEÇÃO GEOLÓGICA DD'

SW



LEGENDA:



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ – UFPR				
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA		CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA		
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:		GEOLOGIA EXPLORATÓRIA		
Título da Dissertação:				
A BACIA HIDROGEOLÓGICA DE CURITIBA				
Local:	Estado:	ESCALAS:	HORIZONTAL	VERTICAL
CURITIBA	PARANÁ	1 : 50.000	1 : 50.000	1 : 1.000
SEÇÃO GEOLÓGICA DD'				
Mestrando:				Data:
JOAO NOGUEIRA FILHO				1997